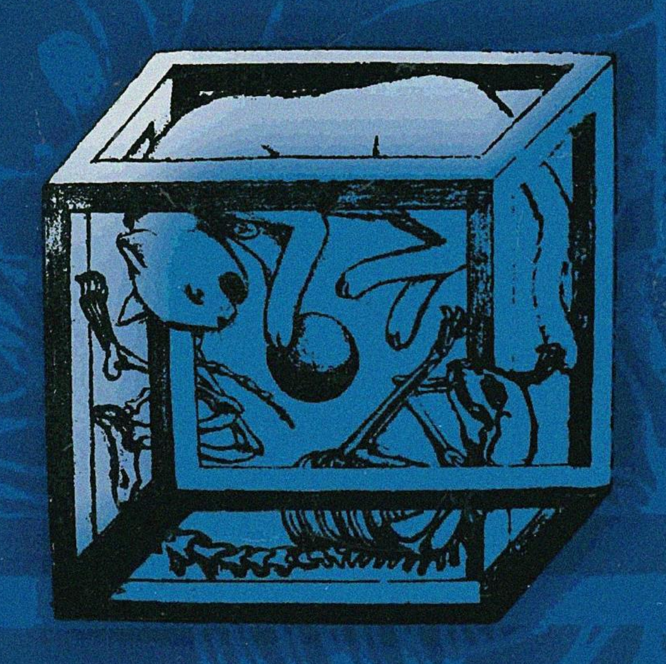
الطبعة الثانية

البحث عن قطة شرودنجر

جون جريبين



ترجمة

أ.د. فتح الله الشيخ

أ.د. أحمد عبدالله السماحي

البحث عن قطة شرودنجر

البحث عن قطة شرودنجر

الفيزياء الكمية والواقع

تأليف: جون جريبين

ترجمة: أ.د/فتح الله محمد إبراهيم الشيخ

مراجعة: أ.د/أحمد عبد الله السماحى





In Search of Schrödinger's Cat
Quantum Physics and Reality

John Gribbin

البحث عن قطة شرودنجر
الفيزياء الكمية والواقع

جون جريبين

الطبعة الثانية ١٤٣١هـ-٢٠١٠م
ISBN 978 977 6263 22 2
جميع الحقوق محفوظة للناشر كلمة وكلمات عربية للترجمة والنشر
(شركة ذات مسئولية محدودة)

كلمة
إن هيئة أبو ظبي للثقافة والتراث (كلمة) غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
ص.ب. ٢٣٨٠ أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة
هاتف: ٩٧١ ٢ ٦٣١٤٤٦٨+ **فاكس:** ٩٧١ ٢ ٦٣١٤٤٦٢+
الموقع على شبكة الإنترنت: www.kalima.ae
البريد الإليكتروني: info@kalima.ae

كلمات عربية للترجمة والنشر
إن كلمات عربية للترجمة والنشر غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
مكتب رقم ٤، عقار رقم ٢١٩٠، زهراء مدينة نصر، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٠٢ ٢٢٧٢٧٤٣١+ **فاكس:** ٢٠٢ ٢٢٧٠٦٣٥١+
البريد الإليكتروني: kalimatarabia@kalimatarabia.com
الموقع الإليكتروني: http://www.kalimatarabia.com

جريبين، جون
البحث عن قطة شرودنجر / جون جريبين . - القاهرة : كلمات عربية للترجمة والنشر، ٢٠٠٩
٣٢٠ص، ١٤,٥×٢١,٠سم
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٦٢٦٣ ٢٢ ٢
١- ميكانيكا الكم
أ- العنوان
٥٣٠,١٢

المحتويات

مقدمة المترجمين	٧
شكر وعرفان	٩
مقدمة	١٣
تمهيد	١٥
الباب الأول: الكـــــم	١٩
١- الضوء	٢١
٢- الذرات	٣٣
٣- الضوء والذرات	٤٩
٤- ذرة بور	٦٧
الباب الثاني: ميكانيكا الكم	٩٥
٥- الفوتونات والإلكترونات	٩٧
٦- المصفوفات والموجات	١١٩
٧- مطبخ الكوانتا	١٤٣
الباب الثالث: ... وما بعد	١٧٥
٨- الفرصة وعدم التيقن	١٧٧
٩- التناقضات والاحتمالات	١٩٩

١٠- برهان البودنج ٢٣٥

١١- العوالم المتعددة ٢٥٥

خاتمة ٢٧٥

بيبلوجرافيا ٢٩٧

مقدمة المترجمين

يتعرض كل من يترجم كتابًا علميًّا مكتوبًا لغير المتخصصين لصعوبات مضاعفة، أما إذا كان الكتاب موضوع الترجمة يتناول نظرية الكم، فإن الأمر يصبح في غاية الصعوبة، سواء للمترجم أو القارئ، لكن جون جريبين بالتضافر مع قطة شرودنجر الشهيرة قد جعلا من هذا العمل شيئًا ممتعًا ومفيدًا، في زعمنا. وليس أحوج من المكتبة العربية لمثل هذه الكتب، وليس أحوج من القارئ العربي لها. ومما لا شك فيه أن تصدي «كلمة» و«كلمات عربية» لترجمة كتب العلوم الحديثة والأساسية، وتقديمها إلى عالم الثقافة في الوطن العربي، يعني الكثير لهذه الثقافة؛ فقد ظل العقل العربي محرومًا من الاتصال — إلا في أضيق الحدود — بهذه العلوم وتلك الثقافة على مدى عدة قرون، فكانت نسبة ما تصدره المطابع العربية في مجال العلوم لا يزيد عن ٣٪ فقط من مجمل إنتاجه، أما وقد بدأت حركة الترجمة العلمية في تغذية المطابع والثقافة والعقول العربية بنهر من الترجمات فإن الوضع في الواقع سيختلف عن ذي قبل. والأمل معقود أن تتفتح العقول وتثري اللغة ويسود المنهج العلمي نواحي الحياة. وسيذكر التاريخ فضل كل من تصدى من دور النشر بشجاعة لأداء رسالة الترجمة عموما والترجمة العلمية على وجه الخصوص.

وقد شرفنا بترجمة الكتاب الذي بين أيديكم، وكلنا رجاء وأمل أن يضيف ولو لبنة صغيرة إلى صرح الثقافة العلمية في الوطن العربي، ويقرب

من ثقافتنا وثقافات العالم المتقدم الذي سبقنا — في الوقت الحاضر على الأقل — حتى نصل إلى مرحلة الإبداع الجموعي في شتى فروع العلوم والمعارف.

فتح الله محمد إبراهيم الشيخ
أحمد عبد الله السماحى
نوفمبر ٢٠٠٨

شكر وعرفان

ترجع معرفتي (بنظرية الكم) إلى أكثر من عشرين سنة مضت منذ أيام المدرسة، وذلك عندما اكتشفت الطريقة السحرية التي فسر بها الجدول الدوري للعناصر نموذج الأغلفة الإلكترونية في الذرة، والمفترض بذلك أنه يفسر كل الكيمياء التي ناضلت من أجلها وتحملت الكثير من الدروس المضجرة، وبتتبع هذا الاكتشاف بمعاونة كتب من المكتبة تَدَّعي أنها «متقدمة أكثر من اللازم» بالنسبة للمستوى المدرسي المتواضع الذي كنت عليه، واكتشفت في الحال البساطة الرائعة التي تفسر بها نظرية الكم الطيف الذري، وقد خبرت بنفسي للمرة الأولى إلهامًا بأن أفضل الأشياء في العلم هي التي تتمتع بالجمال والبساطة، وهى الحقيقة التي يخفيها كثير جدًّا من المعلمين عن تلاميذهم، إما عن قصد أو عن غير قصد، وقد شعرت بنفس شعور الشخصية في رواية سنو C. P. Snow البحث — التي قرأتها بعد ذلك بكثير — واكتشفت الشيء نفسه:

> «لقد شاهدت خليطًا من الحقائق المبعثرة تنتظم في خط وتترتب …
> لكن ذلك كان حقيقيًّا» قلت لنفسي: «إنه جميل جدًّا وهو حقيقي»
> (طبعة ماكميلان ١٩٦٣ صفحة ٢٧).

وقد قررت دراسة الفيزياء في الجامعة جزئيًّا بفضل هذه البصيرة، وطبعًا تحقق هذا الطموح وأصبحت طالبًا لدرجة البكالوريوس في جامعة سوسيكس Sussex في برايتون Brighton، غير أن البساطة والجمال اللذين في أساس

الأفكار قد اختنقا في فيض من التفاصيل والوصفات الرياضية لحل المسائل النوعية بمساعدة معادلات ميكانيكا الكم، ويبدو أن تطبيق هذه الأفكار في عالم الفيزياء اليوم يحمل من الصدق والجمال مثل ما تحمله قيادة طائرة ٧٤٧ مقارنة بالطيران الشراعي، ومع ذلك فإن قوة البصيرة الأولى قد بقيت مؤثرًا رئيسيًّا في أعمالي، وقد أهملت عالم الكم فترة طويلة ورحت أستكشف في مرعى علمي آخر.

أضرمت عدد من الحقائق المتضامنة نيران الاهتمامات الأولى من جديد؛ ففي نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين بدأت تظهر كتب ومقالات تحاول تقديم عالم الكم الغريب للجمهور غير المتخصص وذلك بدرجات متفاوتة من التوفيق، وكان بعض الكتب التي تزعم أنها «تبسط» مفرطة في الخيال ومبتعدة عن الصدق لدرجة أنني أتصور أن أي قارئ لا يمكن أن يكتشف صدق وجمال العلم بقراءة هذه الكتب، وبدأت أشعر باندفاع نحو القيام بهذا العمل بصورة أكمل، في الوقت نفسه أخذت ترد الأنباء حول سلاسل التجارب المستمرة التي توصلت إلى واقعية بعض أكثر السمات غرابة في نظرية الكم.

وقد حمستني هذه الأنباء أن أعود للتنقيب والبحث في المكتبات وتجديد فهمي لهذه الأفكار الغريبة، وأخيرًا وفي أحد أيام عيد الميلاد طلبت مني بي بي سي (BBC) أن أشارك في برنامج إذاعي كنوع من الاتجاه المقابل لاتجاه مالكولم موجريدج (Malcolm Muggeridge) الذي أعلن حديثًا تحوله إلى الديانة الكاثوليكية وكان هو الضيف الرئيسي في زمن هذا المهرجان، وبعد أن قال هذا الرجل الكبير قوله مؤكدًا على أسرار المسيحية، استدار ناحيتي وقال: «غير أن هنا رجلًا يعرف كل الإجابات أو يدعي أنه يعرفها.» وفي الوقت المحدود الذي كان في حوزتي حاولت أن يكون رد فعلي هادئًا مشيرًا إلى أن العلم لا يدعي معرفة جميع الإجابات، وإنما الدين — وليس العلم — هو الذي يعتمد أساسًا على الإيمان المطلق والقناعة بـأن الحقيقة معروفة. وقلت: «أنا لا أعتقد في أي شيء.» وكنت بصدد الاستطراد في هذه الفلسفة عندما انتهى البرنامج، وقد حياني الأصدقاء وحيتني المعرفة طوال

موسم المهرجان كصدى لهذه الكلمات. وقد أمضيت الساعات في تفسير ما مفاده أن عدم إيماني المطلق بأي شيء لم يمنعني من الحياة بصورة عادية مستفيدًا من الافتراضات المنطقية السارية مثل الاحتمال الأقوى ألا تختفي الشمس ليلاً.

بلورت هذه العملية أفكاري حول ماهية العلم، وتضمنت الكثير من مناقشة الواقعية الأساسية — أو اللاواقعية — لعالم الكم، بما يكفي لإقناعي أنني كنت في الواقع مستعدًّا لكتابة الكتاب الذي تمسكون به الآن، وأثناء إعداد الكتاب راجعت الكثير من الحجج والأسانيد الدقيقة في مساهماتي العلمية المنتظمة في البرامج الإذاعية التي استضافني فيها تومي فانس Tommy Vance التي بثتها خدمة الإذاعة بالقوات البريطانية، وسرعان ما كشفت أسئلة توم الاختبارية العيوب في برامجي وأدت إلى تنظيم أفضل لأفكاري. كانت مكتبة جامعة سوسيكس المصدر الرئيسي لمراجع المادة المستخدمة في إعداد الكتاب، التي تملك واحدة من أفضل المجموعات من كتب نظرية الكم الموجودة في أي مكان، وقد تتبع ماندي كابلين Mandy Caplin من نيو ساينتست New Scientist من أجلي بعض أكثر المراجع غموضًا وهو يملك طريقة مقنعة فيما يتعلق برسائل التلكس، وقامت كريستين ساتون Christine Sutton بتعديل بعض اعتقاداتي الخاطئة حول فيزياء الجسيمات ونظرية المجال، ولم تزودني زوجتي بكل ما يلزم فيما يتعلق بالبحث وتنظيم المادة فقط بل عدَّلت أيضًا كثيرًا من الزوايا الحادة، وأنا ممتن أيضًا للأستاذ رودلف بيرلز (Rudolf Peierls) الذي تحمل مشقه الشرح التفصيلي لحدة الذهن الخاصة بتجربة «الساعة في الصندوق» و«تناقض EPR».

وهكذا فإن أي إطراء على جودة هذا الكتاب يجب أن يرفع إلى كتب الكيمياء «المتقدمة» التي نسيت أسماءها الآن، وكنت قد وقعت عليها في مكتبة مقاطعة كنت وأنا بعد في السادسة عشر من العمر، وللكتب «المبسطة» كذبًا وما نشر عن أفكار الكم التي أقنعتني أنني أستطيع أن أقوم بذلك بصورة أفضل، ومالكولم ماجريدج وبى بى سى (BBC) ومكتبة جامعة سوسيكس

وتومي فانس وبى.بى.إس، وماندى كابلين وكريستين ساتون وعلى وجه الخصوص مين. أما أي شكوى تتعلق بالسلبيات في الكتاب فمرجعها بالطبع إليّ.

جون جريبين
John Gribbin
يوليو ١٩٨٣

مقدمة

لو وضعت كل الكتب والمقالات التي كتبت لغير المتخصصين حول النظريات النسبية جنبًا إلى جنب فإنها قد تصل المسافة بين الأرض والقمر. و«يعرف كل إنسان» أن النظرية النسبية لأينشتاين هي أعظم إنجاز علمي في القرن العشرين، لكن الكل على خطأ. أما إذا وضعت كل الكتب والمقالات المكتوبة عن نظرية الكم لغير المتخصصين جنبًا إلى جنب فإنها قد تغطى بالكاد سطح الطاولة التي أجلس عليها، ولا يعنى ذلك أن نظرية الكم ليست معروفة خارج القاعات الأكاديمية، بل في الواقع أصبحت ميكانيكا الكم ذات شعبية جارفة في بعض الأوساط حيث إنها قد استخدمت لتفسير ظواهر مثل التخاطر عن بعد وانثناء الملاعق، وقدمت مادة خصبة من الأفكار لروايات عديدة من الخيال العلمي. وتعرف ميكانيكا الكم في الأساطير الشائعة، إذا كانت معروفة على الإطلاق، بأنها فرع العلوم الخفي والغريب المسئول عن التخاطر عن بعد وعلم النفس غير العادي وليس معروفًا إلا لفئة قليلة من الناس، والذي لا يفهمه أحد وليس له استخدام عملي.

وفي الحقيقة كتب هذا الكتاب لمواجهة هذا السلوك تجاه أكثر المجالات أهمية في الدراسات العلمية الأساسية. ويدين هذا الكتاب بنشأته إلى عدة عوامل تضافرت معًا في صيف ١٩٨٢، وأول هذه العوامل هو أنني كنت قد انتهيت لتوي من كتابة كتاب في النسبية وتحدب الفضاء، وشعرت أنه من المناسب أن أقتحم الفرع العظيم الآخر من علوم القرن العشرين وأحاول فك

طلاسمه. والعامل الثاني هو أنني كنت مستثارًا بصورة متزايدة بالاعتقادات الخاطئة التي كانت تُسَوَّق تحت اسم نظريه الكم في الأوساط غير العلمية. وقد أفرخ كتاب فريتجوف كابرا Fritjof Capra الرائع «طاوية الفيزياء» The Tao of Physics عددًا من المقلدين الذين لم يفهموا الفيزياء ولا الطاوية لكنهم تكهنوا بوجود مال يمكن كسبه بربط العلم الغربي بالفلسفة الشرقية. أما العامل الأخير فهو الأنباء التي جاءت في أغسطس/آب ١٩٨٢ من باريس عن نجاح فريق علمي في إجراء اختبار حاسم مؤكد لدقة وجهة نظر ميكانيكا الكم عن العالم وذلك للذين لا يزالون يشككون في نظرية الكم.

ولا تبحث هنا عن أي «صوفيه شرقية» أو انثناء الملاعق أو التخاطر عن بعد مع ظواهر علم النفس الغريب، لكن عليك أن تبحث هنا عن القصة الحقيقة لميكانيكا الكم، وهى حقيقة أغرب كثيرًا من الخيال، وهكذا هو العلم؛ فهو لا يحتاج إلى تجهيز ليصبح جاهزًا تمامًا لفلسفة أخرى، فهو مليء ببهجته الخاصة وأسراره ومفاجآته. والسؤال الذي يواجهه هذا الكتاب هو «ما الواقعية؟» وقد تفاجئك الإجابة (أو الإجابات) وقد لا تصدقها، ولكنك ستكتشف كيف يرى العلم المعاصر العالم.

تمهيد

لا شيء حقيقي

القطة الموجودة في عنوان هذا الكتاب حيوان خرافي أما شرودنجر فشخص حقيقي؛ كان إيرفين شرودنجر (Erwin Schrödinger) عالمًا نمساويًّا ساعد في تطوير معادلات فرع من العلوم المعروف الآن باسم ميكانيكا الكم وذلك في منتصف عشرينيات القرن العشرين، ومع ذلك فلا يصلح تعبير «فرع من العلوم» إلا بصعوبة هنا، لأن ميكانيكا الكم تزودنا بالأساس المتين القوي لكل العلوم الحديثة، وتصف المعادلات سلوك الأجسام المتناهية الصغر — بمعنى تلك التي في حجم الذرة أو أصغر — وتزودنا أيضًا بالطريقة الوحيدة لفهم عالم الأشياء المتناهية الصغر، وبدون هذه المعادلات لم يكن يمكن للفيزيائيين أن يصمموا محطات القوى النووية العاملة (أو القنابل النووية) ولا أن يحصلوا على أشعة الليزر، أو حتى يشرحوا الطريقة التي تحتفظ فيها الشمس بسخونتها، ولولا ميكانيكا الكم لظلت الكيمياء في عصورها المظلمة، ولما وجد علم البيولوجيا الجزيئية — ولا كنا سنفهم الدنا (DNA) أو الهندسة الوراثية — أبدًا.

وتمثل ميكانيكا الكم أعظم إنجازات العلم، وهي ذات مغزى مباشر وعملي بعيد جدًّا، أبعد بكثير من النظرية النسبية، ومع ذلك فلها بعض

التنبؤات الغريبة جدًّا. وعالم ميكانيكا الكم غريب جدًّا في الواقع، لدرجة أن ألبرت أينشتاين قد وجد أنها مبهمة وغير مفهومة ورفض أن يتقبل كل تضمينات هذه النظرية التي طورها شرودنجر وزملاؤه، وكان أينشتاين وكثير من العلماء الآخرين يجدون أنه من المريح أن يعتقدوا أن معادلات ميكانيكا الكم تمثل ببساطة نوعًا من الحيل الرياضية، التي تعطينا سبيلاً معقولاً يرشدنا إلى سلوك الذرات والجسيمات تحت الذرية، لكنه يخفى بعض الحقيقة الدفينة التي تتواءم بصورة أقرب مع إحساسنا العادي بالواقعية؛ ذلك أن ميكانيكا الكم تنادي بألا شيء حقيقي، ولا يمكننا قول أي شيء عما تفعله الأشياء عندما لا نشاهدها، وقد استخدمت قطه شرودنجر الأسطورية لتوضح بجلاء الفرق بين عالم الكم والعالم اليومي.

ففي عالم ميكانيكيا الكم تتوقف قوانين الفيزياء المألوفة في حياتنا اليومية عن العمل، وبدلاً من ذلك فإن الاحتمالات هي التي تتحكم في الأحداث؛ فقد تتفكك ذرة مشعة وتبث إلكترونًا مثلاً أو قد لا تفعل ذلك، ومن الممكن وضع تجربة بحيث تكون لإحدى الذرات في كتلة مشعة فرصة ٥٠:٥٠ (خمسين:خمسين) بالضبط أن تتفكك في زمن معين ويسجل تفككها إذا وجد جهاز كشاف، وقد حاول شرودنجر — المستاء مثل أينشتاين بالضبط — أن يبين سخف هذه التضمينات وذلك بتخيل تجربة مثل المذكورة موضوعة في غرفة مغلقة أو صندوق مغلق يحتوي على قطة حية وقنينة بها سم، وقد رتبت هذه الأشياء بحيث إذا حدث وتفككت الذرة المشعة تنكسر القنينة المحتوية على السم وتموت القطة، وهنالك فرصة ٥٠:٥٠ أن تموت القطة لو طبقنا مفاهيم عالم الحياة اليومية، ويمكن القول — دون أن ننظر داخل الصندوق، وبكل راحة — إن القطة إما حية أو ميتة. والآن لنأخذ في الحسبان غرابة عالم الكم، وتبعًا للنظرية فلا يمكن تطبيق أحد الاحتمالين بالنسبة للمادة المشعة ومن ثم للقطة، ولذا لا يوجد واقع إلا إذا شاهدناه، وليس معروفًا هل حدث التفكك الذري أم لم يحدث، وهل قتلت القطة أم لم تقتل إلا إذا نظرنا داخل الصندوق لنرى ماذا حدث. ويقول النظريون الذين يقبلون النسخة النقية من ميكانيكا الكم إن القطة موجودة في حالة

غير محددة، فهي ليست حية ولا ميتة حتى ينظر أحد المشاهدين داخل الصندوق ليرى ما الذي يجري هناك فلا شيء حقيقي إلا إذا شاهدناه.

كانت الفكرة منبوذة ومحرَّمة من أينشتاين وآخرين، وكان يقول: «إن الرب لا يلعب بالنرد.» مشيرًا إلى النظرية التي تحكم العالم بواسطة تراكم مخرجات فرص عشوائية في الأساس لاحتمالات على المستوى الكمي، وفيما يتعلق بعدم واقعية الحالة التي عليها قطة شرودنجر، فإن أينشتاين رفض هذه الفكرة، مفترضًا أنه لا بد أن يكون هناك نظام منضبط يصنع الأسس الأصلية لواقعية الأشياء، وقد أنفق سنوات عديدة محاولاً تصميم اختبارات يمكن بواسطتها استيضاح الواقعية الموجودة في أساس الأشياء وهى تعمل لكنه مات قبل أن يصبح من الممكن إجراء مثل هذا الاختبار، وربما بنفس القدر لم يمتد به العمر ليرى مخرجات أحد خطوط المنطق الذي بدأه بنفسه.

في صيف سنة ١٩٨٢ وفي جامعة جنوب باريس بفرنسا أكمل فريق يقوده آلان أسبكت Alain Aspect سلسلة من التجارب المصممة لاكتشاف الواقعية الموجودة في أساس عالم الكم غير الواقعي، وقد أطلقوا على الواقعية الموجودة في الأساس — المنظومة المنضبطة الأساسية — اسم «المتغيرات الخفية» Hidden Variables وقد قامت التجربة على سلوك فوتونَيْن أو جسيمين من جسيمات الضوء ينطلقان مبتعدين أحدهما عن الآخر في اتجاهين مضادين من أحد المصادر، وقد وصفت التجربة بالتفصيل في الفصل العاشر، لكن في جوهرها يمكن تخيلها كاختبار للواقعية، ويمكن مشاهدة الفوتونين المنطلقين من المصدر نفسه بواسطة كشافين اثنين يقومان بقياس خاصية تسمى الاستقطاب (Polarization)، وتبعًا لنظرية الكم، فإن هذه الخاصية غير موجودة إلا إذا قمت بقياسها. وتبعًا لفكرة المتغير الخفي، فإن كل فوتون يمتلك استقطابًا «حقيقيًّا» منذ اللحظة التي نشأ فيها، ولأن الفوتونين قد انبعثا معًا فإن استقطابيهما مرتبطان أحدهما بالآخر، غير أن طبيعة الارتباط المقاس بالفعل يختلف تبعًا لوجهتي النظر حول الواقعية.

ونتائج هذه التجربة الحاسمة ليست غامضة، فلم يثبت وجود نوع الارتباط الذي تنبأ به المتغير الخفي، أما نوع الارتباط الذي تنبأت به ميكانيكا الكم فقد ثبت وجوده، والأكثر من ذلك فإن القياس الذي يجري على أحد الفوتونين له تأثير لحظي على طبيعة الفوتون الآخر كما تنبأت بذلك نظرية الكم، ويرتبط الفوتونان بصورة لا سبيل إلى الخلاص منها بواسطة بعض التداخلات حتى وإن كانا يندفعان مبتعدين أحدهما عن الآخر بسرعة الضوء، وتبعًا للنظرية النسبية لا يمكن أن تنتقل أي إشارة أسرع من الضوء، وأثبتت التجارب أنه لا توجد واقعية في أساس العالم، وليست «الواقعية» طريقة جيدة تصلح للتفكير في سلوك الجسيمات الأساسية التي يتكون منها العالم، ومع ذلك، وفي الوقت نفسه، فيبدو أن هذه الجسيمات مرتبطة بشكل لا ينفصم في كل لا يتجزأ، بحيث يدرك كل واحد منها ما يحدث لغيره.

وما البحث عن قطة شرودنجر إلا البحث عن الواقعية الكمية، وقد يبدو من هذا المخطط الموجز أن البحث غير ذي جدوى، حيث لا توجد واقعية في المفهوم اليومي للكلمة، غير أن هذه ليست نهاية القصة، وقد يؤدي بنا البحث عن قطة شرودنجر إلى فهم جديد للواقعية الذي قد يفوق ويتضمن التفسير المتعارف عليه لميكانيكا الكم، وأثر ذلك بعيد، إلا أنه مع ذلك يبدأ من عالم من المحتمل أن يصاب بهلع أكثر من أينشتاين إذا وقع على الإجابات التي في حوزتنا الآن على الأسئلة المربكة التي وضعها. ولم يكن عند إسحق نيوتن (Isaac Newton) أدنى فكرة، عندما كان يدرس طبيعة الضوء منذ ثلاثة قرون، أنه كان بالفعل قد وقع على الأثر الذي سيؤدي إلى قطة شرودنجر.

الباب الأول

الكـــم

«أي شخص لا يصاب بصدمة من نظرية الكم فإنه لم يفهمها.»

نيلس بور ١٨٨٥–١٩٦٢



الفصل الأول

الضوء

اخترع إسحاق نيوتن الفيزياء، وتعتمد كل العلوم على الفيزياء، وبالتأكيد أسس نيوتن ذلك على أعمال آخرين، إلا أن نشر قوانينه الثلاثة عن الحركة ونظرية الجاذبية منذ ثلاثمائة سنة بالضبط هو الذي أطلق العلم ووضعه على الطريق التي أدت إلى الطيران في الفضاء، والليزر، والطاقة الذرية، والهندسة الوراثية، وفهم الكيمياء، وبقية العلوم. وعلى مدى مائتي عام سادت فيزياء نيوتن (التي تسمى الآن الفيزياء «الكلاسيكية») بقوة، وفي القرن العشرين أخذت الآراء الثورية الجديدة الفيزياء أبعد كثيرًا من نيوتن، إلا أنه بدون هذين القرنين من التطور العلمي لم يكن إنجاز هذه الآراء الجديدة ممكنًا. وليس هذا الكتاب تاريخًا للعلوم، وهو معني بالفيزياء الجديدة — فيزياء الكم — أكثر من تلك الأفكار الكلاسيكية، لكن حتى في أعمال نيوتن منذ ثلاثة قرون كانت هناك إشارات عن التغيرات التي ستأتي فيما بعد، ليس من دراساته لحركة الكواكب ومداراتها، ولا من قوانينه المشهورة الثلاثة، ولكن من أبحاثه عن طبيعة الضوء.

تدين أفكار نيوتن عن الضوء بالكثير لأفكاره عن سلوك الأجسام الجامدة ومدارات الكواكب، وقد أيقن نيوتن أن خبراتنا اليومية عن سلوك الأجسام قد تكون مضللة، وأن جسمًا ما — وليكن جسيمًا — غير خاضع لأي قوى خارجية لا بد أن يسلك بطريقة مختلفة جدًّا عن سلوك مثل هذه الجسيم لو كان على سطح الأرض. وتدلنا خبرتنا اليومية أن الأشياء تميل للبقاء في مكان واحد إلا إذا تعرضت لدفعة، وأنه بمجرد توقفك عن دفع

هذه الأشياء فإنها ستتوقف مباشرة بعد ذلك، إذن لماذا لا تتوقف الأجسام مثل الكواكب أو القمر عن الحركة في مداراتها؟ وهل يدفعها شيء ما؟ أبدًا على الإطلاق، إنما الكواكب هي التي في حالة طبيعية، وغير خاضعة لأي تدخل خارجي، والأجسام التي على سطح الأرض هي التي تتعرض للتدخل. وإذا حاولت أن أجعل قلمًا ينزلق على سطح طاولتي، فإن دفعي للقلم يقاومه احتكاك القلم بسطح الطاولة، وهذا ما يجعل القلم يتوقف عندما أتوقف عن دفعه، فإذا لم يكن هناك احتكاك لظل القلم في حركة دائمة. وينص القانون الأول لنيوتن على أنه يظل كل جسم في حالة سكون أو يتحرك بسرعة ثابتة إلا إذا أثرت عليه قوة خارجية. وينبئنا القانون الثاني بمدى التأثير الذي تؤديه قوة خارجية — دفعة — على جسم ما، فمثل هذه القوة تغير من سرعة الجسم، ويسمى التغير في السرعة التسارع؛ فإذا قسمت القوة على كتلة الجسم الذي تؤثر فيه القوة الخارجية فإن الناتج هو التسارع الذي ينتج عن تأثير القوة على الجسم، وعادة ما يكتب هذا القانون الثاني بطريقة مختلفة شيئًا ما: القوة هي حاصل ضرب الكتلة في التسارع. ويخبرنا قانون نيوتن الثالث بعض الشيء عن رد فعل الأجسام التي تُدفع: لكل فعل رد فعل مساو له ومضاد في الاتجاه؛ فإذا ضربت كرة التنس بمضربي، فإن القوة التي يدفع بها المضرب كرة التنس تطابق تمامًا القوة التي تدفع المضرب إلى الخلف. والقلم الموجود على سطح طاولتي يشد إلى أسفل بواسطة الجاذبية ويدفع في الاتجاه المضاد برد فعل مساو لها تمامًا بواسطة سطح الطاولة نفسه. وقوة عملية الانفجار التي تدفع الغازات إلى خارج غرفة الاشتعال في الصاروخ تنتج قوة رد فعل مضادًّا ومساويًا تمامًا على الصاروخ نفسه مما يدفعه في الاتجاه المضاد.

وتفسر هذه القوانين مدارات الكواكب حول الشمس ومدار القمر حول الأرض بالإضافة إلى قانون نيوتن عن الجاذبية، وإذا أخذنا في الاعتبار الاحتكاك فإن هذه القوانين تفسر كذلك سلوك الأجسام على سطح الأرض وهى تشكل بذلك أسس الميكانيكا، غير أنها تتضمن تضمينات فلسفية مربكة، فتبعًا لقوانين نيوتن يمكن بالضبط التنبؤ بسلوك جسيم على أساس

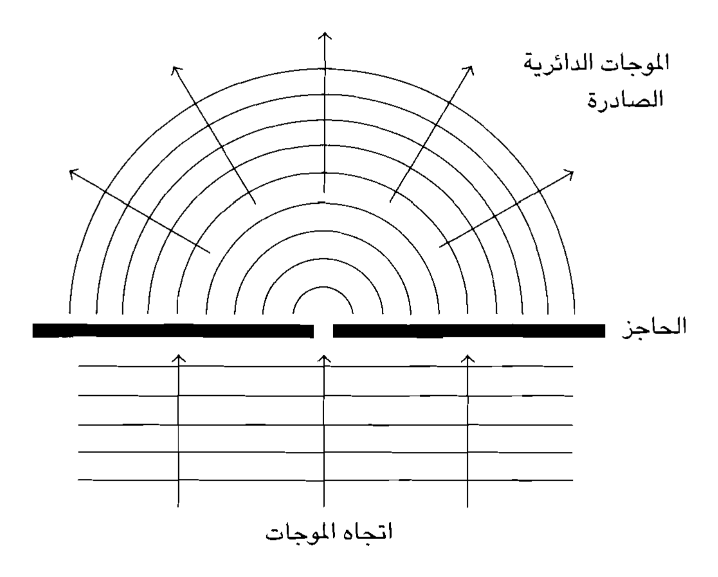
تداخله مع الجسيمات الأخرى والقوى التي تؤثر عليه، وإذا كان من الممكن في النهاية معرفة موقع وسرعة كل جسيم في الكون، فيكون من الممكن إذن التنبؤ بدقة كاملة بمستقبل كل جسيم ومن ثَمّ بمستقبل الكون. فهل يعنى ذلك أن الكون قد سار مثل الساعة بعد دفعة من الخالق وضعته في حركته على مسار معين معروف بدقة كاملة؟ وقد أمدت ميكانيكا نيوتن الكلاسيكية هذه النظرة الحتمية للكون بكثير من الدعم، في صورة لم تدع سوى القليل من حرية الإرادة أو الفرصة للإنسان. فهل يمكن في الواقع أن نكون جميعًا دمى نسير في مساراتنا المضبوطة مسبقًا في حياتنا، بدون فرص اختيار حقيقية على الإطلاق؟ كان معظم العلماء يتركون هذا الأمر للفلاسفة يتجادلون حوله، غير أن الأمر تغير بقوة، فأصبح السؤال في قلب الفيزياء الجديدة في القرن العشرين.

موجات أم جسيمات

ومثل هذا النجاح المزود بفيزياء عصر نيوتن حول الجسيمات، من الصعب أن نفاجأ بأنه عندما حاول أن يفسر سلوك الضوء لجأ إلى مصطلحات الجسيمات؛ ففي النهاية تنتقل أشعة الضوء في خطوط مستقيمة كما نشاهدها، كما أن الطريقة التي يرتد بها الضوء عن المرآة تشبه كثيرًا جدًّا الطريقة التي ترتد بها الكرة عن حائط صلب. وقد بنى نيوتن أول تلسكوب عاكس، وفسر الضوء الأبيض على أنه مزيج من كل الألوان في قوس قزح، وأجرى الكثير من الدراسات عن الضوء، لكن ظلت نظرياته تقوم على افتراض أن الضوء يتكون من تيار من دقائق، تسمى الجسيمات. تنثني أشعة الضوء عندما تعبر السطح الفاصل بين مادتين إحداهما خفيفة والأخرى ثقيلة مثل الهواء والماء أو الماء والزجاج (وهذا هو السبب الذي تبدو فيه عصا الكوكتيل وكأنها مثنية عند وضعها في محلول شفاف)، وتفسر نظرية الجسيمات هذا الانكسار بجلاء إذا كانت الجسيمات تنتقل أسرع في المادة الأكثر «كثافة ضوئية»، وحتى أيام نيوتن كانت هناك طريقة بديلة لتفسير كل ذلك.

كان الفيزيائي الهولندي كريستيان هوجينز Christiaan Huygens من معاصري نيوتن، لكنه كان أكبر منه بثلاثة عشر عامًا حيث ولد سنة ١٦٢٩، وقد قام بتطوير فكرة أن الضوء ليس تيارًا من الجسيمات لكنه موجة أقرب شبهًا بالموجات التي تتحرك على سطح البحر أو سطح بحيرة، إلا أنه ينتقل خلال مادة غير مرئية تسمى «الأثير الوضاء» (luminiferous ether). ومثل التموجات التي تحدثها حصاة ألقيت في بركة، فإن موجات الضوء يمكن تخيلها تنتشر من مصدر الضوء في جميع الاتجاهات، وقد فسرت نظرية الموجات الانعكاس والانكسار تمامًا مثل نظرية الجسيمات، مع أنها تقول إن موجات الضوء تتحرك أبطأ خلال المادة الأكثف ضوئيًّا، ولم تكن هناك وسيلة متاحة لقياس سرعة الضوء في القرن السابع عشر، وعليه فإن الفرق في السلوك كان سيفض الاشتباك والتناقض بين النظريتين، غير أن النظريتين تختلفان في أحد التنبؤات الحاسمة للمشاهد؛ فعندما يعبر الضوء حافة حادة فإنه ينتج ظلًّا ذا حافة حادة، وهذه هي بالضبط الطريقة التي يجب أن تسلكها تيارات الجسيمات التي تنتقل في خطوط مستقيمة، أما الموجة فإنها تنثني أو تحيد قليلاً متخذة طريقها خلال الظل (تذكر التموجات على سطح البركة التي تنثني حول صخرة). ومنذ ثلاثمائة سنة مضت كانت نظرية الجسيمات هي السائدة بناء على هذا الدليل، أما نظرية الموجات فمع استبعادها فإنها ظلت غير منسية، غير أن وضع النظريتين قد انعكس كلية ببداية القرن التاسع عشر.

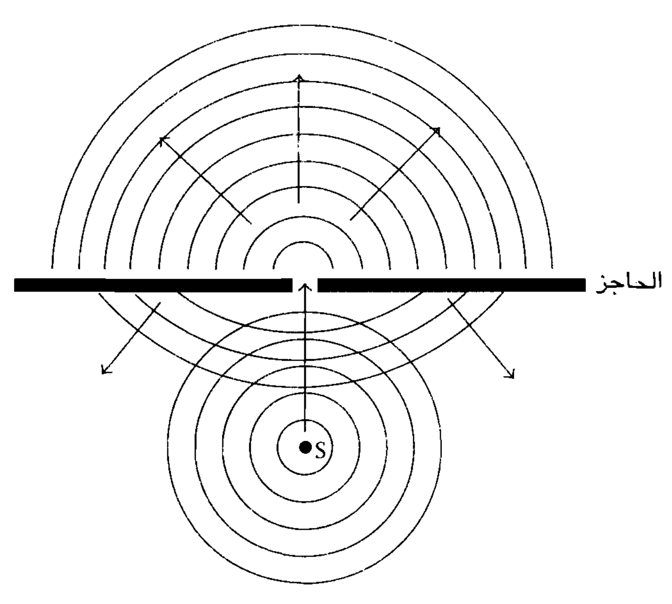
وفي القرن الثامن عشر كان عدد قليل من الناس يأخذون نظرية موجات الضوء بجدية، وكان أحد هؤلاء القليلين الذي لم يأخذ النظرية بجدية فقط بل كتب مؤيدًا لها العالم السويسرى ليونارد يولر(Leonard Euler)، رائد الرياضيات في عصره الذي أسهم بمساهمات رئيسية في تطوير الهندسة وحساب التفاضل والتكامل وحساب المثلثات. وتعبِّر المصطلحات الحسابية عن الرياضيات والفيزياء الحديثة بواسطة المعادلات، وقد قام يولر بتطوير التقنيات التي يعتمد عليها التوصيف الحسابي بصورة كبيرة، وأثناء هذا التطوير أدخل يولر طرق الاختزال بالرموز التي ظلت مستخدمة



شكل ١-١: تعبر موجات الماء المتوازية من خلال ثقب صغير في حاجز لتنتشر في دوائر مركزها الثقب ولا تترك «ظلالًا».

حتى الآن — يرجع إليه استخدام الاسم باي (pi) لنسبة محيط الدائرة إلى قطرها، والحرف i للدالة على الجذر التربيعي للعدد (−١) (الذي سنقابله مرة أخرى هو وباي (pi) وهو الذي أدخل الرموز المستخدمة بواسطة الرياضيين للدلالة على عمليات التكامل. (ومن الاستطراد: مع ذلك، فإن دائرة المعارف البريطانية لا تشير إلى وجهات نظره حول نظرية الموجات للضوء، وهى وجهات النظر التي قال عنها أحد معاصريه إنه لا يؤيدها «فيزيائي واحد من المشهورين».*) كان بنيامين فرانكلين Benjamin Franklin هو الفيزيائي الوحيد من ذوي الشهرة الذي شارك في وجهات النظر هذه، غير أن الفيزيائيين لم يجدوا صعوبة في إهمالها حتى أجرى الإنجليزي توماس يونج (Thomas Young) تجاربه الجديدة الحاسمة في

* مقتبسه من ص٢ من كتاب ميكانيكا الكم Quantum Mechanics تأليف إرنست إكنبري (Ernest Ikenberry) راجع الببليوجرافيا.

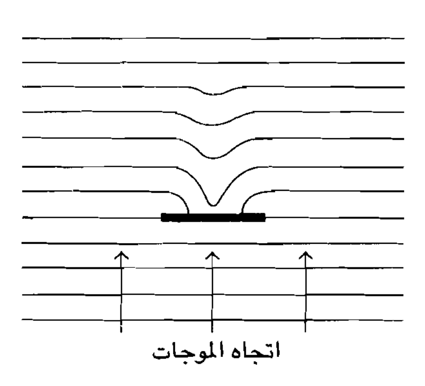


شكل ١-٢: التموجات الدائرية مثل تلك التي يحدثها حجر يلقى في بركة، تنتشر هي أيضًا على شكل موجات دائرية مركزها الثقب إذا عبرت من خلال فتحة ضيقه (وبالطبع ستنعكس الموجات التي تصطدم بالحاجز إلى الخلف مرة أخرى).

بداية القرن التاسع عشر، وتبعه الفرنسي أوجستين فرسنل (Augustin Fresnel) بعدد ذلك مباشرة.

انتصار نظرية الموجات

استخدم يونج معرفته عن حركة الموجات على سطح بركة ليصمم تجربة لاختبار ما إذا كان الضوء ينتشر بنفس الطريقة أم لا، ونحن نعرف جميعًا شكل موجات الماء، ومن الأفضل مع ذلك أن نفكر في التموجات بدلًا من الموجات الكبيرة لندقق التشابه بين التموجات (الماء والضوء). وما يميز الموجات هو أنها ترفع مستوى الماء إلى أعلى قليلًا ثم تخفضه بمرور الموجة، ويسمى ارتفاع قمة الموجة فوق مستوى الماء سعة الموجة وفي حالة الموجة



شكل ١-٣: مقدرة الموجات على الانثناء حول الأركان تعني كذلك أنها تستطيع ملء الظل خلف العائق بسرعة، إذا لم يكن العائق أكبر كثيرًا من طول الموجة.

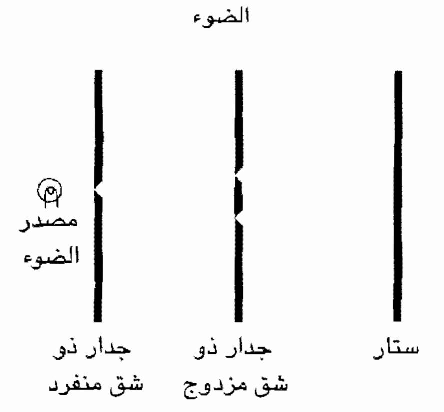
المثالية فإن هذه السعة مساوية تمامًا لانخفاض مستوى الماء عند مرور الموجة، وتتبع التموجات بعضها بعضًا في تسلسل مثل تسلسل التموجات الناتج عن إلقاء حجر في البركة، وتحتفظ هذه التموجات بمسافة منتظمة بين كل منها تسمى طول الموجة، وتقاس بين قمتين متتاليين، وتنتشر الموجات على شكل دوائر حول النقطة التي سقطت فيها الحصاة في الماء، غير أن موجات البحر أو التموجات التي تحدث على سطح بحيرة بفعل هبوب الرياح، قد تنتشر على شكل سلسلة من خطوط مستقيمة من موجات متوازية الواحدة تلو الأخرى، وفي كل الأحوال فإن عدد قمم الموجات التي تعبر نقطه مثبتة ومعينة — صخرة مثلًا — في الثانية الواحدة يخبرنا بتردد الموجة، والتردد هو عدد الموجات التي تعبر كل ثانية، وبذلك فإن سرعة الموجة، أو السرعة التي تتقدم بها كل قمة من قمم الموجات تساوي طول الموجة مضروبًا في التردد.

تبدأ التجربة الحاسمة بموجات متوازية، تشبه خطوط الموجات التي تتقدم نحو الشاطئ قبل أن تتحطم، ومن الممكن تخيل ذلك بالموجات التي يحدثها إلقاء جسم كبير جدًا في الماء وعلى مسافة كبيرة، وستشبه الرقرقات المنتشرة في دوائر متنامية الموجات المتوازية أو المستوية إذا كنت بعيدًا عن

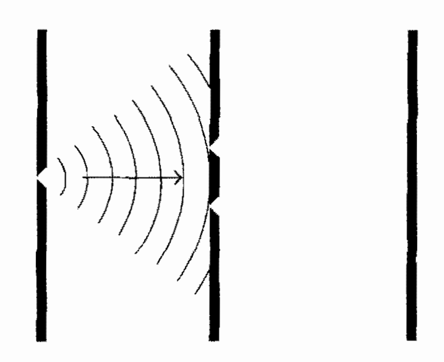
مصدر الرقرقات لأنه من الصعب اكتشاف استدارة الدوائر الكبيرة جدًا المتمركزة حول نقطة بداية الاضطراب، ومن السهل فحص ما يحدث لمثل هذه الموجات المستوية في خزان للماء عندما تقابل عائقًا في طريقها؛ فإذا كان العائق صغيرًا فإن الموجات ستنثني حوله وستملأ ما وراءه بواسطة الحيود تاركة «ظلًّا» صغيرًا جدًّا. أما إذا كان العائق كبيرًا جدًّا مقارنة بطول الموجة في الرقرقات، فإن الأخيرة ستنثني قليلًا في الظل خلف العائق تاركة منطقة من المياه غير المضطربة. فإذا كان الضوء موجة، فإنه من الممكن الحصول على ظل للحواف الحادة لو كان طول موجة الضوء صغيرًا جدًّا مقارنه بحجم الجسم الذي يلقي بظله.

والآن لنمعن في الفكرة من ناحية أخرى؛ تخيل مجموعة رائعة من الموجات المستوية تتقدم عبر خزان المياه وتقترب ليس من حاجز صغير محاط بالماء بل من جدار كامل يسد طريقها وبه ثقب في المنتصف، فإذا كان الثقب أكبر كثيرًا من طول موجة الاضطرابات، فإن الجزء من الموجات المواجه لهذا الثقب سيعبر وينتشر قليلًا جدًّا تاركًا معظم الماء خلف الجدار دون أي اضطراب، مثل الموجات التي تضرب حاجز الأمواج في الموانى وتدخل من فتحة الميناء فقط، أما إذا كان الثقب في الجدار صغيرًا جدًّا، فإن الثقب سيعمل عمل مصدر جديد لموجات دائرية، كما لو أن الحصى قد أُلْقِيَ في الماء عند هذه النقطة، وعلى الجانب الأبعد من الجدار تنتشر هذه الموجات الدائرية (أو بدقة أكثر نصف الدائرية) عبر سطح الماء دون أن تترك أي جزء فيه دون اضطراب.

تسير الأمور بشكل حسن حتى الآن، وفي النهاية نصل إلى تجربة يونج، ولنتخيل التجربة نفسها كما ذكرنا، حيث خزان للماء تترقرق فيه موجات متوازية، لكنها هذه المرة تصطدم بحاجز به ثقبان صغيران، سيعمل كل ثقب عمل مصدر جديد للموجات نصف الدائرية في المنطقة من الخزان الواقعة خلف الحاجز، ولأن هاتين الفئتين من الموجات قد نتجا عن الموجات المتوازية نفسها على الجانب الآخر من الحاجز، فإنهما سيتحركان في تناغم أو في الطور نفسه (in phase). عندنا الآن فئتان من التموجات التي تنتشر

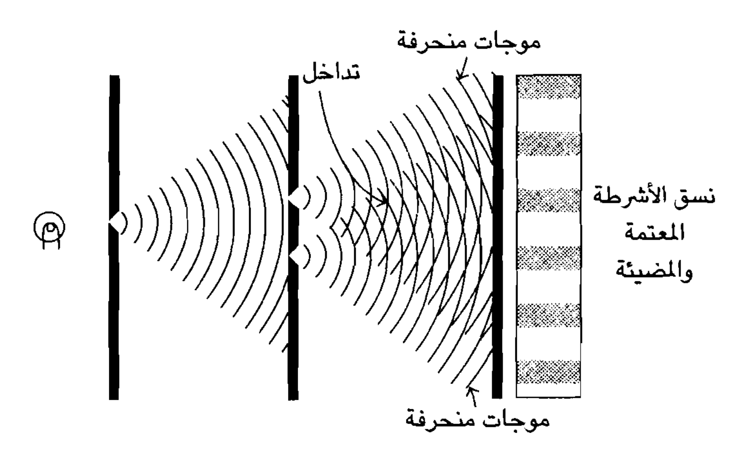


شكل ١-٤: مقدرة الضوء على التشتت حول الأركان ومن خلال الثقوب الصغيرة يمكن اختبارها استخدام شق منفرد لينتج موجة دائرية وشق مزدوج لينتج التداخل.



شكل ١-٥: موجات الضوء تنتشر في دوائر من الشق الأول مثل رقرقات الماء عندما تمر من ثقب، وتتحرك هذه الموجات في تناغم بعضها مع بعض.

عبر المياه، الأمر الذي ينتج عنه نسق أكثر تعقيدًا من التموجات على السطح؛ ففي الموقع الذي ترفع فيه الموجتان الماء إلى أعلى نحصل على قمة أكبر، وإذا كانت إحدى الموجات تحاول رفع الماء وإنشاء قمة والأخرى تحاول خفضه وإنشاء قاع فإن الاثنتين ستتلاشيان ولن يضطرب مستوى الماء، ويطلق على هذين التأثيرين التداخل البناء والتداخل الهدام، ومن السهل رؤيتهما



شكل ١-٦: الموجات الدائرية تقترب من كل ثقب في الستارة المزودة بالشقين وتتداخل لتنتج نسقًا من الضوء والظل يسلك كموجة — في سياق هذه التجربة.

إذا ألقيت بحصاتين في بركة ماء في نفس اللحظة؛ فإذا كان الضوء موجة فلا بد أن ينتج تداخل مماثل بين موجاته إذا أجريت عليه تجربة مكافئة الأمر الذي اكتشفه يونج.

أضاء يونج ستارة موضوعة في مسار الضوء وبها شقان ضيقان، وخلف هذا العائق انتشر الضوء وتداخل، فإذا كان التشبيه بموجات الماء صحيحًا فلا بد أن يكون نسق من التداخل خلف العائق على شكل مناطق متناوبة من الضوء والظلام، ناتجة عن التداخل البناء والتداخل الهدام. وعندما وضع يونج ستارة بيضاء خلف الشقين كان ذلك بالضبط ما شاهده؛ تناوب أشرطة من الضوء والظل على طول الستارة.

غير أن تجربة يونج لم تشعل حماس عالم العلوم، وبالذات في بريطانيا، فقد كانت المؤسسة العلمية هناك تنظر إلى أي معارضة لأي فكرة من أفكار نيوتن على أنها هرطقة تقريبًا وبالقطع عمل غير وطني. مات نيوتن سنة ١٧٢٧، وسنة ١٧٠٥ — أي أقل من مائة عام قبل إعلان يونج اكتشافاته — أصبح أول رجل يحصل على «الفروسية» على أعماله العلمية،

وكان مقدرًا لهذا الوثن أن يخلع عن عرشه في القريب العاجل في إنجلترا، وربما كان من المناسب في زمن حروب نابليون أن يقوم بذلك رجل فرنسي هو أوجستين فرسنل، الذي أخذ على عاتقه الفكرة «غير الوطنية» وأرسى في نهاية المطاف التفسير الموجي للضوء. ومع أن أعمال فرسنل جاءت بعد سنوات قليلة من أعمال يونج، فإنها كانت أكثر اكتمالًا، وقدمت تفسيرًا موجيًّا لكل السمات الافتراضية في سلوك الضوء. ومن بين أشياء أخرى، شرح فرسنل ظاهرة مألوفة لنا جميعًا اليوم وهى الانعكاسات الجميلة الملونة التي تنتج عندما يسقط الضوء على طبقة رقيقة من الزيت، ويرجع السبب في هذه الظاهرة إلى التداخل في الموجات؛ فبعض الضوء ينعكس من السطح العلوي لطبقة الزيت وينفذ البعض الآخر لينعكس على السطح السفلي لطبقة الزيت. وبهذا فهناك شعاعان مختلفان ينعكسان ويتداخلان أحدهما مع الآخر، ولأن كل لون من ألوان الضوء يقابل طول موجة مختلفًا، ويتكون الضوء الأبيض من خلط كل ألوان قوس قزح، فإن انعكاس الضوء الأبيض من طبقة الزيت سينتج كتلة من الألوان؛ لأن بعض الموجات (الألوان) تتداخل بصورة هدامة وتتداخل أخرى بصورة بناءة، وذلك تبعًا لوضع عينك إلى طبقة الزيت.

وعندما توصل الفيزيائي الفرنسي ليون فوكولت Léon Foucault — الذي اشتهر بالبندول الذي يحمل اسمه — في منتصف القرن التاسع عشر إلى أن سرعة الضوء أقل في الماء عن الهواء، على عكس تنبؤات نيوتن ونظرية الجسيمات، كان ذلك مجرد توقع من عالم حسن السمعة، وفي هذا الوقت كان «كل إنسان يعرف» أن الضوء شكل من أشكال الحركة الموجية تنتشر خلال الأثير، مهما كان يعنى ذلك. لكن مع ذلك كان من المستحسن معرفة ما الذي «يترقرق» في شعاع الضوء. وفي ستينيات وسبعينيات القرن التاسع عشر بدا أن نظرية الضوء قد اكتملت أخيرًا عندما توصل الفيزيائي الاسكتلندي العظيم جيمس كلارك ماكسويل (James Clerk Maxwell) إلى وجود موجات تتضمن مجالات كهربية ومغناطيسية متغيرة، وقد تنبأ ماكسويل بهذه الإشعاعات الكهرومغناطيسية لتتضمن

أنساقا من مجالات كهربية ومغناطيسية أقوى وأضعف بالطريقة نفسها التي تتضمن بها موجات الماء قممًا وقيعانًا في مستوى الماء، وقد نجح هنريش هيرتز Heinrich Hertz سنة ١٨٨٧ — أي منذ مائة عام فقط — في بث واستقبال إشعاع كهرومغناطيسي على شكل موجات راديو، تشبه موجات الضوء لكن موجاتها أطول كثيرًا من موجات الضوء، وأخيرًا اكتملت النظرية الموجية للضوء — تمامًا في الوقت نفسه الذي قلبت فيه المفاهيم بواسطة الثورة العظمى في الفكر العلمي منذ أيام نيوتن وجاليليو. وبحلول نهاية القرن التاسع عشر لم يكن لأحد أن يقترح أن الضوء جسيمات إلا إذا كان هذا الشخص عبقريًّا أو غبيًّا؛ كان اسمه ألبرت أينشتاين، لكن قبل أن نفهم لماذا اتخذ هذه الخطوة الجريئة لا بد لنا من زيادة خلفيتنا حول الأفكار الفيزيائية في القرن التاسع عشر.

الفصل الثاني

الذرات

تقول كثير من المؤلفات الشائعة في تاريخ العلوم إن فكرة الذرات يرجع تاريخها إلى الإغريق القدماء، أي منذ عصر ميلاد العلوم، وتمتدح هذه المؤلفات القدماء على بصيرتهم النافذة حول الطبيعة الحقيقية للمادة، إلا أن هذا التقرير يضخم الحقيقة قليلًا؛ ففي الحقيقة كان ديمقريطس Democritus من أبديرا، الذي توفي نحو ٣٧٠ ق.م.، قد افترض أن الطبيعة المعقدة للعالم يمكن تفسيرها إذا كانت كل الأشياء تتكون من أنواع مختلفة من ذرات غير قابلة للتغير، بحيث يكون لكل نوع من الذرات شكله وحجمه الخاص، وهي في حركة دائمة، وقال ديمقريطس إن «الأشياء الوحيدة الموجودة هي الذرات والفراغ، وماعدا ذلك فمجرد آراء».* وقد تبنى كل من إيبكيوريوس Epicurius من ساموس ورومان ليوكريتيوس Roman Lucretius Carus هذه الفكرة بعد ذلك، لكن هذه الفكرة لم تكن هي الرائدة في تلك الأيام على النظريات الأخرى في تفسير طبيعة العالم، بل كان اقتراح أرسطو بأن كل شيء في الكون مصنوع من «العناصر» الأربعة: النار، والأرض، والهواء، والماء، هو الذي حقق شعبية «أكبر كثيرًا» وظل صامدًا. وقد نسيت تمامًا فكرة الذرات في فترة ميلاد المسيح، وتقبل العالم عناصر أرسطو الأربعة على مدى ألفي عام.

ومع أن روبرت بويل Robert Boyle الإنجليزي قد استخدم مفهوم الذرات في أعماله الكيميائية في القرن السابع عشر، وكان نيوتن يفكر فيها

* مقتبسة من كتب كثيرة بما في ذلك دعوة إلى الفيزياء Invitation to Physics تأليف جاي م. باساتشوف ومارك ل. كوتنر (Jay M. Pasachoff & Marc L. Kutner) (صفحة ٣).

في أبحاثه في الفيزياء والضوء، فإن الذرات لم تصبح جزءًا من الفكر العلمي إلا في القسم الأخير من القرن الثامن عشر، عندما درس الكيميائي الفرنسي أنطوان لافوازيه Antoine Lavoisier سبب احتراق الأشياء، وقد حدد لافوازيه عناصر حقيقية عديدة، وهي المواد الكيميائية النقية، التي لا تتفكك إلى مواد كيميائية أخرى، وقد تحقق لافوازيه أن الاحتراق هو ببساطة العملية التي يتحد بواسطتها أكسجين الهواء الجوي بالعناصر الأخرى، وفي السنوات الأولى من القرن التاسع عشر تمكن جون دالتون John Dalton من وضع دور الذرات في الكيمياء على قدمين ثابتتين، وقد قرر أن المادة تتكون من ذرات غير قابلة للانقسام، وأن ذرات كل عنصر متماثلة، وللعناصر المختلفة أنواع مختلفة من الذرات (أحجام وأشكال مختلفة)، وأن الذرات لا تخلق ولا تفنى، لكنها تخضع لإعادة ترتيب أثناء التفاعلات الكيميائية، وأن المركبات الكيميائية المصنوعة من عنصرين أو أكثر، تتكون من جزيئات، كل منها يتكون من عدد بسيط ثابت من ذرات العناصر الداخلة في تركيب المركب، وبذلك يكون المفهوم الذري للعالم المادي لم يصبح في الواقع على الصورة التي يدرس بها في المراجع اليوم إلا منذ أقل من مائتي عام مضت.

ذرات القرن التاسع عشر

ومع ذلك فإن الفكرة لم تكتسب ثقة الكيميائيين إلا ببطء خلال القرن التاسع عشر، وقد توصل جوزيف جاي-لوساك (Joseph Gay-Lussac) بالتجربة إلى أنه عندما تتحد مادتان غازيتان فإن حجم أي غاز منهما المطلوب دائمًا نسبته بسيطة إلى حجم الغاز الآخر، وإذا كان المركب الناتج غازيًّا فإن حجم هذا الغاز الثالث هو الآخر نسبته بسيطة إلى الغازين الآخرين. ويعتبر ذلك متوافقًا مع فكرة أن جزيء المركب يتكون من ذرة أو ذرتين من أحد الغازين متحدة بعدد قليل من ذرات الغاز الآخر، وقد استخدم الإيطالي آماديو أفوجادرو Amadeo Avogadro هذا البرهان سنة

١٨١١ ليتوصل إلى فرضيته الشهيرة التي تنص على أنه عند درجة حرارة وضغط ثابتين تحتوي الحجوم المتساوية من الغازات على العدد نفسه من الجزيئات، مهما اختلفت الطبيعة الكيميائية لهذه الغازات. وقد أكدت التجارب اللاحقة أن فرضية أفوجادرو صحيحة، ومن الممكن إثبات أن كل لتر من الغاز تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة صفر سلزية يحتوي تقريبًا على ٢٧٠٠٠ بليون بليون (٢٧ × ١٠^٢١) جزيء. لكن لم تتطور الفكرة إلا على يد ابن بلد أفوجادرو، واسمه ستانيسلاو كانيزارو Stanislao Cannizzaro في خمسينيات القرن التاسع عشر الذي طورها بحيث بدأ بعض الكيميائيين يأخذونها مأخذ الجد. ومع ذلك فحتى في تسعينيات القرن التاسع عشر كان مازال كثير من الكيميائيين لا يتقبلون أفكار دالتن وأفوجادور. لكن قد تخطتهم الأحداث في ذلك الحين في سياق تطور الفيزياء، حيث فُسِّر سلوك الغازات بالتفصيل، وذلك باستخدام مفهوم الذرات بواسطة الاسكتلندي جيمس كلاك ماكسويل والنمساوي لودفيج بولتزمان Ludwig Boltzmann.

وخلال ستينيات وسبعينيات القرن التاسع عشر طور هؤلاء الرواد فكرة أن الغاز يتكون من ذرات أو جزيئات كثيرة جدًّا (يعطيك الرقم الذي تستنتجه من فرضية أفوجادرو فكرة عن هذا العدد)، وهي دقائق فائقة الصغر على شكل كرات صلبة تتحرك في كل الاتجاهات متصادمة بعضها مع بعض ومع جدران الوعاء الذي يحتويها، ويرتبط ذلك مباشرة بفكرة أن الحرارة شكل من أشكال الحركة؛ فعندما يسخن الغاز تتحرك الجزيئات أسرع، الأمر الذي يرفع من الضغط على جدران الوعاء، أما إذا لم تكن الجدران مثبتة فإن الغاز سيتمدد، وكانت السمة الرئيسية في هذه الأفكار الجديدة هي أن سلوك الغاز يمكن تفسيره بتطبيق قوانين الميكانيكا — قوانين نيوتن — بطريقة إحصائية على أعداد كبيرة من الذرات أو الجزيئات؛ ففي أي وقت يمكن أن يتحرك أي جزيء في أي اتجاه، لكن التأثير الجمعي لهذه الجزيئات الكثيرة المتصادمة مع جدران الإناء كل ثانية هو حدوث ضغط ثابت، وقد أدى ذلك إلى التوصل إلى توصيف رياضي لعمليات الغازات،

التي تسمى الميكانيكا الإحصائية، لكن لا يزال لا يوجد برهان مباشر على وجود الذرات، وقد جادل بعض الفيزيائيين العظام في ذلك الوقت ضد الفرضية الذرية، بل حتى في تسعينيات القرن التاسع عشر كان بولتزمان نفسه يشعر (ربما خطأً) بأنه وحده يناضل ضد مد الأفكار العلمية. وسنة ١٨٩٨ نشر حساباته التفصيلية على أمل أنه «عندما يعاد النظر في نظرية الغازات مرة أخرى، لن يكون هناك الكثير ليعاد اكتشافه»* وسنة ١٩٠٦ كان يعاني المرض والإحباط والتعاسة لمواصلة كثير من العلماء الرواد في معاداة أفكاره حول نظرية الحركة للغازات، مما دفعه للانتحار، غير مدرك أن أحد النظريين المغمورين ويدعى ألبرت أينشتاين قد نشر قبل بضعة أشهر مقالة علمية توصل فيها إلى حقيقة وجود الذرات دون أدنى شك.

ذرات أينشتاين

لم تكن هذه المقالة سوى واحدة من ثلاث مقالات نشرها أينشتاين في نفس المجلد من حوليات الفيزياء Annalen der Physik سنة ١٩٠٥، وكانت أي واحدة منها كفيلة بحجز مكان له في سجل تاريخ العلوم. تناولت إحدى المقالات تقديم نظرية النسبية الخاصة وهي بعيدة عن مجال كتابنا هذا، وقد عنيت المقالة الثانية بالتدخل الفعال بين الضوء والإلكترونات، وقد اعترف بها فيما بعد كأول عمل علمي يتناول ما نطلق عليه اليوم ميكانيكا الكم، وكانت هذه المقالة هي التي حصل بسببها أينشتاين على جائزة نوبل سنة ١٩٢١. أما المقالة الثالثة فقدمت تفسيرًا بسيطًا بدرجة خادعة لأحجية حيرت العلماء من سنة ١٨٢٧؛ التفسير الذي أسس، كما لم تفعل أي مقالة نظرية أخرى، واقعية الذرات.

وقد صرح أينشتاين فيما بعد أن هدفه الأساسي في ذلك الوقت كان «اكتشاف الحقائق التي تؤكد بوضوح ما أمكن وجود الذرات بأحجام

* مقتبسة من التطور التاريخي لنظرية الكم (The Historical Development of Quantum Theory)، الجزء الأول صفحة ١٦ تأليف جاجديش ميهرا وهيلموت ريتشنبرج (Jagdish Mehra & Helmut Rechenberg).

محددة.»* وهو الهدف الذي ربما يدل على أهمية الأبحاث في مطلع القرن العشرين. وفي وقت نشر هذه الأبحاث كان أينشتاين يعمل فاحصًا للاختراعات في برن — ولم تجعله طريقته غير التقليدية في تناول الفيزياء مرشحًا واضحًا لمنصب أكاديمي عندما أنهى تعليمة الرسمي، فكانت الوظيفة في مكتب الاختراعات مناسبة له. وقد أثبت عقله المنطقي أنه قادر على التمييز بين الغث والثمين في الاختراعات الجديدة، وتركت له خبرته في الوظيفة المزيد من الوقت الحر ليفكر في الفيزياء حتى أثناء ساعات عمله في المكتب، وقد عنيت بعض أفكاره تلك بالاكتشاف الذي توصل إليها عالم النبات البريطاني توماس براون (Thomas Brown) منذ ثمانين عامًا تقريبًا؛ فقد لاحظ براون أن حبوب اللقاح التي تسبح في قطرة ماء عند فحصها بالميكروسكوب تتحرك حركة عشوائية غير منتظمة تسمى الآن حركة براونيان Brownian motion. وقد أثبت أينشتاين أنه مع أن هذه الحركة عشوائية، فإنها تخضع لقانون إحصائي تمامًا، وأن نسق السلوك هو بالضبط ما يجب أن نتوقعه إذا كانت حبة اللقاح «تضرب» باستمرار بجسيمات لا ترى وأصغر من أن يرصدها الميكروسكوب، وتتحرك في توافق مع الإحصاء الذي استخدمه كل من بولتزمان وماكسويل لوصف الطريقة التي تتحرك بها الذرات في غاز أو سائل، وتبدو الصورة واضحة اليوم لدرجة أنه من الصعب إعطاء الأولوية في الاكتشاف لتلك المقالة. وقد تعودنا أنا وأنت على فكرة الذرات ونستطيع أن نحكم في الحال أنه إذا كانت حبوب اللقاح تضرب بواسطة صدمات غير مرئية، فلا بد أن تكون هذه هي الذرات المتحركة التي تدفع بحبوب اللقاح من حولها. غير أنه قبل أن يبين أينشتاين السبب، كان علماء محترمون لا يزالون يشككون في حقيقة الذرات، أما بعد ظهور مقالته فلم يعد هناك مجال للشك، لقد كان الأمر بسيطًا وسهلًا عند شرحه، مثل وقوع التفاحة من الشجرة، وحسنا، إذا كان الأمر بهذا الوضوح فلماذا لم يتوصل إليها

* مقتبسة من «مذكرات تاريخ حياة أينشتاين الذاتية» (Autobiographical Notes) في كتاب: ألبرت آينشتاين: الفيلسوف والعالم (Albert Einstein: Philosopher Scientist) تحرير ب. أ. شليب (P. A. Schlipp) وتيودور Tudor، نيويورك، ١٩٤٩ (صفحة ٤٧).

أحد في العقود الثمانية الماضية؟ ومن سخريات القدر أن هذه المقالة العلمية كان مقدرًا لها أن تنشر بالألمانية (في مجلة حوليات الفيزياء لأنها كانت معروضة لمشاهير العلماء المتحدثين بالألمانية مثل إرنست ماخ Ernst Mach ووليهلم أوستوالد Wilhelm Ostwald الذين يبدو أنهم أقنعوا بولتزمان أنه كان الصوت الوحيد في البرية. وفي الحقيقة، مع بداية القرن العشرين كان هناك الكثير من الأدلة على واقعية الذرة، حتى ولو قلنا بتحفظ إن هذه الأدلة يمكن وصفها بأنها ظرفية أو ثانوية، وقد تعهد الفيزيائيون البريطانيون والفرنسيون النظرية الذرية بإدانة شديدة أكثر كثيرًا من زملائهم الألمان، وكان ج. ج. طومسون J. J. Thomson الإنجليزي هو الذي اكتشف الإلكترون — الذي نعلم الآن أنه أحد مكونات الذرة — سنة ١٨٩٧.

الإلكترونات

دار كثيرٌ من الجدل والنقاش في أواخر القرن التاسع عشر فيما يتعلق بطبيعة الإشعاع الناتج من سلك يمر به تيار كهربي موجود في أنبوبة مفرغة من الهواء. قد تكون أشعة الكاثود تلك — كما كانت تدعى — نوعًا من الإشعاع ناتجًا من ذبذبة الأثير لكنها مختلفة في خواصها عن الضوء وعن موجات الراديو المكتشفة حديثًا، وقد تكون تيارات من جسيمات دقيقة. أيد معظم العلماء الألمان فكرة موجات الأثير، أما معظم البريطانيين والفرنسيين فكان رأيهم أن أشعة الكاثود لا بد أن تكون جسيمات، وقد تسبب اكتشاف أشعة-X صدفة بواسطة ويلهلم رونتجن Wilhelm Röntgen سنة ١٨٩٥ (حصل رونتجن سنة ١٩٠١ على أول جائزة نوبل في الفيزياء على هذا الاكتشاف) في زيادة تعقيد الوضع، إلا أن ذلك لم يكن سوى سمكة رنجة مدخنة.* ومع أهمية هذا الاكتشاف — كما ثبت سريعًا بعد ذلك — فإنه قد حدث قبل وجود الإطار النظري من الفيزياء الذرية التي تناسبه، وسنقابل هذه الأمور في سياق أكثر منطقية مع تطور روايتنا.

* تعبير يقال للشيء الذي يصرف الانتباه (المترجمان).

عمل طومسون في معمل كافندش، وهو مركز أبحاث في كمبريدج أسسه ماكسويل حين كان أول أستاذ كرسى كافندش في سبعينيات القرن التاسع عشر. وقد صمم طومسون تجربة تعتمد على الموازنة بين الخواص الكهربية والمغناطيسية للجسيمات المشحونة المتحركة، ومن الممكن تغيير مسار مثل هذه الجسيمات باستخدام المجال المغناطيسي أو المجال الكهربي، وقد صمم* جهاز طومسون بحيث يلغي أحد هذين المجالين تأثير الآخر ليمر شعاع أشعة الكاثود في خط مستقيم من لوح الفلز المشحون سالبًا (أو الكاثود) إلى شاشه استكشاف. ولا تصلح هذه الطريقة إلا مع الجسيمات المشحونة كهربيًّا، وهكذا توصل طومسون إلى أن أشعة الكاثود هي في الحقيقة جسيمات مشحونة شحنة سالبة (تسمى إلكترونات الآن).† وقد تمكن طومسون من استخدام الاتزان بين القوى الكهربية والقوى المغناطيسية لحساب نسبة شحنة الإلكترون الكهربية إلى كتلته (e/m). وقد حصل على نفس النتائج مهما غير من الفلز المصنوع منه الكاثود، مما جعله يستنتج أن الإلكترونات جزء من الذرات، ومع أن العناصر المختلفة مصنوعة من ذرات مختلفة فإن كل الذرات تحتوى على الإلكترونات نفسها.

لم يكن ذلك اكتشافًا بالصدفة مثل ما حدث في اكتشاف أشعة-X، لكنه جاء نتيجة تخطيط محكم وتجارب عن خبرة؛ أنشأ ماكسويل معمل كافندش، لكن بقيادة طومسون أصبح هذا المعمل مركزًا رائدًا للفيزياء التجريبية — وربما كان المعمل الرائد عالميًّا في الفيزياء — حيث كان في قلب أحدث الاكتشافات التي أدت إلى الفهم الحديث للفيزياء في القرن العشرين، وكما حصل نفسه على جائزة نوبل، كذلك حصل سبعة من الذين عملوا

---

* كلمة صمم هي الكلمة الصحيحة هنا، فمن المشهور عن ج. ج. طومسون أنه كان أخرق لكنه كان يصمم تجارب مذهلة ليقوم بها أناس آخرون. ويصرح ابنه جورج أن ج. ج. (كما كان معروفا دائما) «قادر على تشخيص أخطاء أي جهاز بدقة خارقة، بنفس الدرجة التي تمنعه من التعامل معه». (راجع الاستبيانات Questioners تأليف باربارا لوفيت كلاين ص ١٣).

† ليست الشاشة التي تشاهد عليها صور التليفزيون إلا جزءًا من مثل هذه الأنبوبة، وتسمى أنبوبة أشعة الكاثود، وما أشعة الكاثود التي تشكل صور التليفزيون إلا إلكترونات تمسح الشاشة بواسطة مجالات مغناطيسية متغيرة تمامًا مثل تلك التي درسها طومسون.

تحت قيادته في معمل كافندش على الجائزة نفسها في فترة ما قبل سنة ١٩١٤، وقد ظل هذا المعمل مركزًا عالميًّا للفيزياء حتى يومنا هذا.

الأيونات

اتضح أن أشعة الكاثود التي تنتج من لوح مشحون شحنة سالبة في أنبوبة مفرغة من الهواء جسيمات مشحونة شحنة سالبة هي الإلكترونات، وحيث إن الذرات متعادلة كهربيًّا، من المنطق أن يكون هناك أجزاء مقابلة للإلكترونات، لكن بشحنة موجبة، هي الذرات التي بها قطعة من الشحنة السالبة التي تقذف إلى الخارج. وقد كان ويلهلم فاين Wilhelm Wien من جامعة فورزبرج Würzburg من أوائل من درسوا هذه الأشعة الموجبة سنة ١٨٩٨، وتوصل إلى أن الجسيمات المكونة لهذه الأشعة أثقل كثيرًا من الإلكترونات، كما تتوقع إذا كانت هذه مجرد ذرات فقدت إلكترونها، وبعد أبحاثه على أشعة الكاثود أخذ طومسون على عاتقه تحديات دراسة هذه الأشعة الموجبة في سلسلة من التجارب الصعبة امتدت حتى عشرينيات القرن العشرين، ويطلق على هذه الأشعة اليوم الذرات المتأينة، أو ببساطة أيونات، أما في أيام طومسون فكانت تسمى أشعة القنال canal rays، وقد درس طومسون هذه الأشعة باستخدام أنبوبة معدلة لأشعة الكاثود، كانت تحتوى قليلًا من الغاز الذي لم يفرغ حتى النهاية بواسطة مضخة التفريغ. كانت الإلكترونات التي تتحرك خلال الغاز تتصادم مع ذراته لتركل إلكترونات أخرى منها تاركة الأيونات المشحونة شحنة موجبة، التي يمكن التعامل معها بالمجالين الكهربي والمغناطيسي بالطريقة نفسها التي تعامل بها طومسون مع الإلكترونات نفسها. وبحلول سنة ١٩١٣ كان فريق طومسون يجري قياساته على حيود الأيونات الموجبة للهيدروجين والأكسجين وغازات أخرى، وكان أحد الغازات الذي استخدمه طومسون في هذه التجارب هو النيون، ووجد أن آثارًا من النيون في الأنبوبة المفرغة تتوهج بشدة إذا مر خلالها تيار كهربي، وبذلك يكون جهاز طومسون هو

الرائد لأنابيب النيون الحديثة، وما وجده طومسون كان أهم كثيرًا جدًّا من مجرد اكتشاف نوع جديد من إشارات الدعاية.

وعلى عكس الإلكترونات التي كان لها جميعًا النسبة e/m نفسها، فقد اتضح وجود ثلاث أيونات مختلفة للنيون، لها جميعًا كمية الشحنة نفسها مثل الإلكترون (e+ بدلًا من e−) لكنها تختلف في الكتلة. وكان ذلك أول دليل على أن العناصر الكيميائية تحتوي عادة على ذرات لها كتلة مختلفة (أوزان ذرية مختلفة) لكن لها جميعًا الخواص الكيميائية نفسها، ويطلق على هذه التغيرات في العناصر «النظائر»، إلا أن الوقت كان مبكرًا جدًّا قبل أن يتوصل إلى تفسير لوجودها، ومع ذلك، فقد كان لدى طومسون معلومات كافية ليبدأ أولى محاولات تفسير ماهية الذرة وما تشبهه من الداخل؛ فهي لم تكن جسيمة نهائية غير قابلة للانقسام — كما كان يظن قليل من الفلاسفة الإغريق — لكنها خليط من شحنات موجبة وسالبة بحيث يمكن طرد الإلكترونات منها.

وقد تصور طومسون الذرة شيئًا مثل البطيخة، أي كرة كبيرة نسبيًّا تنتشر خلالها الشحنة الموجبة، أما الإلكترونات الصغيرة فمدفونة فيها مثل بذور البطيخ، ويحمل كل منها شحنته السالبة الصغيرة الخاصة به، وقد اتضح خطأه، لكنه قدم للعلماء الهدف الذي يوجهون أسلحتهم نحوه بالفعل، وقد أدت خبرتهم في التعامل مع هذا الهدف إلى الفهم الدقيق للبنية الذرية، وحتى نرى كيف حدث ذلك علينا أن نرجع خطوة للوراء في تاريخ العلوم لنتمكن عندئذ من الإقدام للأمام.

أشعة X

اتضح أن مفتاح فك أسرار بنية الذرة هو اكتشاف النشاط الإشعاعي سنة ١٨٩٦، وكما حدث في اكتشاف أشعة X قبل بضعة أشهر، فإن ذلك كان توفيقًا وحظًّا طيبًا، إلا أن هذا التوفيق وذلك الحظ قد تصادف أن وقعا في بعض معامل الفيزياء في ذلك الوقت. كان ويلهلم رونتجن يجري تجاربه

على أشعة الكاثود مثل كثيرين من الفيزيائيين في تسعينيات القرن التاسع عشر، وقد تبين أنه عند اصطدام هذه الأشعة — الإلكترونات — بجسم مادي فإن الصدمة ينتج عنها أشعة ثانوية، وهذه الأشعة غير مرئية إلا أنه يمكن الكشف عنها بواسطة تأثيرها في الألواح الفوتوغرافية أو الأفلام أو بتأثيرها في قطعة من جهاز يسمى الشاشة الفلورسنتية، التي تصدر شررًا من الضوء عندما تصطدم بها الأشعة. وقد حدث أن رونتجن كان لديه شاشة فلورسنتية موضوعة على طاولة بجوار تجربته بأشعة الكاثود، وسرعان ما لاحظ أن هذه الشاشة تتوهج كلما حدث تفريغ خلال أنبوبة أشعة الكاثود في التجربة، وقد أدى به ذلك إلى اكتشاف الأشعة الثانوية التي أطلق عليها «X» لأن x ترمز عادة إلى كمية مجهولة في المعادلات الرياضية، وسرعان ما تبين أن أشعة X تسلك مثل الموجات (نحن نعرف الآن أنها نوع من الأشعة الكهرومغناطيسية، تشبه إلى حد بعيد موجات الضوء لكن أطوالها أقصر كثيرًا منه) وقد ساعد هذا الاكتشاف الذي وقع في معمل ألماني في تأكيد وجهة نظر العلماء الألمان حول أشعة الكاثود التي لا بد أن تكون هي الأخرى موجات.

أُعلن عن اكتشاف أشعة X في ديسمبر سنة ١٨٩٥ وأحدث ذلك ثورة في المجتمع العلمي، وقد حاول باحثون آخرون اكتشاف طرق أخرى لإنتاج أشعة X أو أنواع أخرى من الأشعة، وكان أول من نجح في ذلك هو هنري بيكريل Henri Becquerel في باريس. وكانت أكثر سمات أشعة X المخادعة هي الطريقة التي تمر بها خلال كثير من المواد المعتمة دون أي إعاقة، مثل الأوراق السوداء لينتج عنها صورة على لوح فوتوغرافي لم يتعرض من قبل للضوء، وكان بيكيريل مهتمًا بظاهرة الفسفرة Phosphorescence التي تعنى انبعاث الضوء بواسطة مادة سبق أن امتصت الضوء، ولا تبعث الشاشة الفلورسنتية — مثل تلك التي وردت في اكتشاف أشعة X — بالضوء إلا إذا أثيرت بواسطة إشعاع ساقط عليها. ومن خصائص المواد الفوسفورية المقدرة على اختزان الأشعة الساقطة عليها ثم إعادة بثها على شكل ضوء يخفت ببطء على مدى ساعات بعد وضعها في الظلام، وكان من الطبيعي

البحث عن علاقة بين ظاهرة الفسفرة وأشعة X، إلا أن ما اكتشفه بيكيريل لم يكن متوقعًا، تمامًا مثل اكتشاف أشعة X.

النشاط الإشعاعي

قام بيكيريل بتغطية لوح فوتوغرافي بورق أسود مزدوج وذلك في فبراير/ شباط سنة ١٨٩٦، ثم غطى الورق بأملاح بيكبريتات اليورانيوم والبوتاسيوم وعرض كل هذه اللفة للشمس لعدة ساعات، وعندما تم إظهار اللوح ظهرت خطوط وأشكال الكيماويات التي تغطي اللوح. اعتقد بيكيريل أن أشعة X قد تولدت في ملح اليورانيوم الذي يغطي اللوح بواسطة ضوء الشمس، تمامًا كما في حالة الفسفرة، وبعد يومين قام بتحضير لوح آخر بنفس الطريقة بغرض تكرار التجربة، إلا أن السماء كانت ملبدة بالغيوم في هذا اليوم واليوم الذي يليه، فظل اللوح الذي أعده بيكيريل محفوظًا داخل خزانة. قام بيكيريل عمومًا بإظهار اللوح في الأول من مارس/آذار فوجد مرة أخرى الخطوط والأشكال الخاصة بملح اليورانيوم، ومهما كان الأمر الذي تسبب في تضبيب أو تغميق اللوحين إلا أنه لا علاقة له بضوء الشمس أو الفسفرة، ولكنه كان شكلًا غير معروف من قبل من الإشعاع الذي اتضح أنه يصدر من اليورانيوم نفسه تلقائيًا دون أي مؤثر خارجي، وتسمى هذه المقدرة على بث الأشعة تلقائيًا بالنشاط الإشعاعي.

شرع علماء آخرون في دراسة النشاط الإشعاعي بعد أن أثارهم اكتشاف بيكيريل، وسرعان ما أصبحت ماري وبيير كوري اللذان يعملان في السوربون* خبيرين في هذا الفرع الجديد من العلم، وقد حصلا على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٠٣ عن أبحاثهما في النشاط الإشعاعي وعن اكتشاف عناصر مشعة جديدة، وسنة ١٩١١ حصلت ماري على جائزة نوبل ثانية في الكيمياء وذلك عن أبحاثها التالية في المواد النشطة إشعاعيًا (حصلت إيرين ابنة

* لم يعمل بير كوري أو ماري كوري في السوربون في هذه الفترة قط، بل قاما بجميع أبحاثهما الرئيسية التي حصلا على جائزة نوبل عنها في مدرسة تقنية متوسطة (المترجمان).

ماري وبيير كوري هي الأخرى على جائزة نوبل عن أبحاثها في النشاط الإشعاعي* في ثلاثينيات القرن العشرين). وفي بداية العقد الأول من القرن العشرين كانت الاكتشافات التجريبية في النشاط الإشعاعي متقدمة كثيرًا عن النظرية وذلك بوجود سلسلة من التطورات الجديدة التي لم يتضمنها الإطار النظري إلا فيما بعد، وقد لمع أحد الأسماء خلال هذه الفترة في دراسة النشاط الإشعاعي، وهو اسم إرنست رذرفورد Ernest Rutherford.

كان رذرفورد من نيوزيلندا وقد عمل مع طومسون في معمل كافندش خلال تسعينيات القرن التاسع عشر، وفي عام ١٨٩٨ عين أستاذًا للفيزياء في جامعة ماك جيل في مونتريال، وهناك أثبت هو وفريدريك سودي Frederick Soddy سنة ١٩٠٢ أن النشاط الإشعاعي يتضمن تحول العنصر المشع إلى عنصر آخر. وكان رذرفورد هو الذي اكتشف إنتاج نوعين من الإشعاع بواسطة هذا «التحلل» أو «التفكك» الإشعاعي كما يسمى الآن، وقد أطلق عليهما أشعة ألفا وأشعة بيتا، وعندما اكتشف نوعًا ثالثًا من الإشعاع فيما بعد، كان من الطبيعي أن يطلق عليه أشعة جاما، وقد ثبت أن أشعة ألفا وأشعة بيتا جسيمات سريعة الحركة. وسرعان ما اتضح أن أشعة بيتا ما هي إلا الإلكترونات، وهى المكافئ الإشعاعي لأشعة الكاثود، واتضح أيضًا أن أشعة جاما نوع آخر من الأشعة الكهرومغناطيسية مثل أشعة X بأطوال موجات أقصر كثيرًا من الأخيرة، غير أنه قد تبين أن جسيمات ألفا شيء مختلف تمامًا؛ فهي جسيمات كتلتها أربعة أضعاف كتلة ذرة الهيدروجين تقريبًا وعليها شحنة كهربية موجبة وليست سالبة مقدارها ضعف شحنة الإلكترون.

داخل الذرة

وحتى قبل أن يعرف أي أحد ما هي أشعة ألفا، ولا كيف تنطلق بسرعة عالية جدًا من ذرة تتحول أثناء هذه العملية إلي ذرة عنصر أخرى، تمكن

* لم تحصل إيرين وزوجها فردريك جولي كوري على جائزتهما عن النشاط الإشعاعي، بل على تحضير مواد مشعة صناعيًا وليس طبيعيًا (المترجمان).

الباحثون من أمثال رذرفورد من استخدامها، ومن الممكن استخدام مثل هذه الجسيمات عالية الطاقة — التي هي نفسها نتاج تفاعل ذري — كمجسات لدراسة بنية الذرة. وقد اكتشف مصدر جسيمات ألفا بالمقام الأول، في بحث علمي غير مباشر ومثير. انتقل رذرفورد سنة ١٩٠٧ من مونتريال ليصبح أستاذًا للفيزياء في جامعة مانشستر بإنجلترا، وقد حصل على جائزة نوبل في الكيمياء سنة ١٩٠٨ عن أعماله في مجال النشاط الإشعاعي، وهى الجائزة التي سببت له بعض التسلية الساخرة؛ فمع أن لجنة نوبل كانت تعتبر دراسة العناصر من الكيمياء، فإن رذرفورد كان يعتبر نفسه فيزيائيًّا وليس له علاقة بالكيمياء إلا في أضيق الحدود، وكان يعتبرها فرعًا من العلوم أدنى كثيرًا. (ومع الفهم الجديد للذرات والجزيئات الذي زودتنا به الفيزياء الكمية، فإن النكتة القديمة التي كان يرددها الفيزيائيون من أن الكيمياء هي ببساطة فرع من الفيزياء أصبحت أكثر من نصف الحقيقة). وسنة ١٩٠٩ قام هانس جايجر Hans Geiger وإرنست مارسدن Ernest Marsden أثناء عملهم في قسم ررذرفورد بمانشستر، بإجراء تجارب وُجِّه فيها شعاع من جسيمات ألفا على شريحة رقيقة من فلز ليمر خلالها، وقد جاءت جسيمات ألفا من ذرات لها نشاط أشعاعي طبيعي؛ فلم يكن متاحًا في ذلك الوقت معجل صناعي للجسيمات. وقد حُدِّد مصير الجسيمات الموجهة على شريحة الفلز بواسطة عدادات الوميض وشاشة فلورسنتيه كانت تصدر وهجًا عندما تصطدم بها جسيمة مثل هذه. عبرت بعض الجسيمات في خط مستقيم خلال شريحة الفلز، وانحرف البعض الآخر وخرج يصنع زاوية مع الشعاع الأصلي، والمفاجأة كانت أن البعض انعكس عائدًا إلى الخلف من الشريحة في الجانب نفسه الذي تسقط منه الأشعة، فكيف يمكن حدوث ذلك؟!

جاء رذرفورد بالإجابة: كتلة كل جسيمة من جسيمات ألفا أكبر ٧٠٠٠ مرة من كتلة الإلكترون (في الحقيقة جسيمة ألفا تماثل ذرة هليوم أزيل منها إلكترونان) ويمكن أن تنتقل بسرعة تقارب سرعة الضوء، فإذا اصطدمت مثل هذه الجسيمة بأحد الإلكترونات فإنها ستزيحه جانبًا وتستمر في مسارها

دون أن تتأثر، ولا بد أن يكون سبب الحيود وجود شحنات موجبة في ذرات شريحة الفلز (تتنافر الشحنات المتشابهة)، فإذا كان نموذج البطيخة لطومسون صحيحًا لما انعكست بعض الأشعة إلى الخلف وإذا كانت كرة الشحنة الموجبة تملأ الذرة فإن جسيمات ألفا كانت ستعبر خلالها دون أن تنحرف، ولكن التجربة قد بينت أن معظم الجسيمات قد عبرت في خطوط مستقيمة خلال الشريحة، فإذا سمح نموذج البطيخة بعبور جسيمة واحدة من خلاله فلا بد أن يسمح لكل الجسيمات بذلك، فإذا تركزت كل الشحنة الموجبة في حيز دقيق جدًا وأدق كثيرًا من الذرة ككل، فإنه قد تصطدم جسيمة ألفا أحيانًا بهذا التركيز الدقيق للكتلة والشحنة وبذلك تنعكس عائدة إلى الخلف، وستمر معظم جسيمات ألفا بسرعة خلال الفراغ الموجود بين الأجزاء المشحونة شحنة موجبة في الذرات. ومثل هذا الترتيب فقط هو الذي يجعل الشحنة الموجبة للذرة تتنافر أحيانًا مع جسيمات ألفا موجبة الشحنة وتعكسها إلى الخلف، وأحيانًا تجعلها تحيد قليلًا عن مسارها الأصلي، وأحيانًا أخرى تتركها تعبر دون أي تتدخل في مسارها.

وهكذا اقترح رذرفورد سنة ١٩١١ نموذجًا جديدًا للذرة، وهو النموذج الذي أصبح الأساس في فهمنا الحديث لبنية الذرة، قال رذرفورد بضرورة وجود منطقة مركزية صغيرة في الذرة أطلق عليها النواة تحتوي على كل الشحنة الموجبة للذرة وكمية مساوية تمامًا ومضادة من شحنة سالبة في سحابة الإلكترونات التي تحيط بالنواة، وهنا تصنع النواة والإلكترونات معًا ذرة متعادلة كهربيًا. وقد بينت التجارب فيما بعد أن حجم النواة* يبلغ جزءًا من مائة ألف جزء من حجم الذرة؛ فقطر النواة عادة نحو $١٠^{-١٣}$ سم داخل سحابة إلكترونية قطرها عادة $١٠^{-٨}$ سم، ولتصور هذه الأرقام تخيل رأس دبوس بقطر ربما يصل إلى ملليمتر واحد وموجود في منتصف (مركز) كاتدرائية سان بول ومحاط بسحابة من دقائق الغبار الميكروسكوبية تملأ قبة الكاتدرائية التي تمتد مسافة ١٠٠ متر من رأس الدبوس، يمثل رأس

---

* المقصود قطر النواة أصغر مائة ألف مرة من الذرة ويكون حجم النواة بذلك أصغر $١٠^{١٥}$ مرة أي ألف تريليون مرة من حجم الذرة (المترجمان).

الدبوس نواة الذرة وتمثل دقائق الغبار الحاشية من الإلكترونات. ويدل ذلك على كم الفراغ الموجود في الذرة، وقد صنعت من هذا الفراغ كل الأجسام التي تبدو لنا صلبة والتي يتماسك بعضها مع بعض بواسطة الشحنات الكهربية. (وقد حصل رذرفورد، لو نذكر، على جائزة نوبل عندما توصل إلى هذا النموذج الجديد للذرة؛ النموذج المبني على التجارب التي صممها). غير أن طريقه لم يكن قد بلغ نهايته بعد، لأنه أعلن سنة ١٩١٩ أول تحول صناعي لأحد العناصر، وفي العام نفسه خلف ج. ج. طومسون في منصب مدير معمل كافندش. وقد تم منحه لقب فارس (سنة ١٩١٤) أولًا ثم منح لقب البارون رذرفورد من نيلسون سنة ١٩٣١. ومع كل ذلك، بما في ذلك جائزة نوبل، فإن أعظم مساهماته في العلم كانت بلا شك النموذج النووي للذرة، وكان مقدرًا لهذا النموذج أن ينقل الفيزياء، ويؤدي كما حدث بالفعل إلى سؤال بادي الوضوح: بما أن الشحنات المختلفة تتجاذب فيما بينها بنفس شدة تنافر الشحنات المتشابهة، فلماذا إذن لا تسقط الإلكترونات السالبة على النواة الموجبة؟ وقد جاءت الإجابة من تحليل الطريقة التي تتداخل بها الذرات مع الضوء، بشيرًا بالعصر الآتي لنموذج نظرية الكم الأول.

الفصل الثالث

الضوء والذرات

قام اللغز الذي أثاره نموذج رذرفورد على الحقيقة المعروفة التي تنص على أن الشحنة الكهربية المتحركة بتسارع تشع طاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي — ضوء، أو أي شيء من هذا القبيل، أما إذا كان الإلكترون يجلس دون حركة خارج نواة الذرة، فلا بد له من السقوط داخل هذه النواة، ولن تصبح الذرة ثابتة ومستقرة، وبانهيار الذرة فإنها لا بد أن تبعث بكمية من الطاقة مثل الانفجار، والطريقة الواضحة لمقاومة ميل الذرة للانهيار هي أن نتصور أن الإلكترونات تدور في أفلاك حول النواة، مثل الكواكب التي تدور في أفلاكها حول الشمس في مجموعتنا الشمسية، غير أن الحركة المدارية (الحركة في مدارات) تتضمن التسارع المستمر، وقد لا تتغير سرعة الجسمية التي تدور في فلكها إلا أن الاتجاه الذي تتحرك فيه يتغير، ويحدد كلٌّ من السرعة والاتجاه متجه السرعة (Velocity) وهو الأمر الذي يعنينا، ومع تغير متجه سرعة الإلكترونات فإنها لا بد أن تشع طاقة، ونتيجة فقدها للطاقة فإنها لا بد أن تسقط في مسار حلزوني إلى داخل النواة، ولم يستطع المنظرون (العلماء النظريون) أن يمنعوا انهيار ذرة رذرفورد حتى بابتكار الحركة المدارية.

وعندما نُقِّحَ هذا النموذج، بدأ النظريون من صورة الإلكترونات التي تدور في أفلاك حول النواة، وحاولوا إيجاد أي طريقة للاحتفاظ بهذه الإلكترونات في مداراتها دون أن تفقد طاقة وتنهار في مسار حلزوني إلى الداخل، ولم تكن تلك سوى نقطة بداية طبيعية تتواءم بشكل طيب مع

التشبيه الواضح بالمجموعة الشمسية، إلا أن ذلك كان خطأ، وكما سنرى فيما بعد، فإن ذلك لا يختلف عن وضع الإلكترونات لو كانت موجودة خارج النواة فقط على مسافة معينة ولا تدور حولها، والمشكلة هي نفسها: كيف نوقف سقوط الإلكترونات إلى الداخل؟ لكن الصورة التي نتحايل بها مختلفة جدًّا عن صورة الكواكب التي تدور حول الشمس، وهو أمر جيد تمامًا، وقد استخدم النظريون الحيلة نفسها لتفسير عدم سقوط الإلكترونات سواء استخدمنا التشابه مع المدارات أم لا، وهو تشابه غير ضروري ومخادع، ولا يزال معظم الناس يحتفظون بصورة معينة سواء من المدرسة أو من المقالات المبسطة، لذرة تشبه بالأحرى المجموعة الشمسية، لها نواة دقيقة في المركز وتطن حولها الإلكترونات طائرة في مدارات دائرية، وهنا المكان المناسب لنتخلص من تلك الصورة، ونحاول الاقتراب من العالم الغريب للذرة — عالم ميكانيكا الكم — بعقل متفتح، ولنفكر ببساطة في نواة وإلكترونات موجودة معًا في الفراغ، واسأل نفسك لماذا لا يتسبب التجاذب بين الشحنات الموجبة والسالبة في انهيار الذرة وإطلاق طاقة في هذه الأثناء؟

وفي هذا الوقت الذي بدأ فيه العلماء النظريون محاولاتهم لحل هذا اللغز في العقد الثاني من القرن العشرين، حدثت الاكتشافات الهامة التي كان لا بد لها أن تمنح العلماء النموذج المتطور للذرة، وقد اعتمد العلماء على دراساتهم للطريقة التي تتداخل بها المادة (الذرات) مع الإشعاع (الضوء).

وفي بداية القرن العشرين كانت أفضل وجهة نظر علمية حول العالم الطبيعي تتطلب فلسفة مزدوجة فمن الممكن وصف الأجسام المادية بمدلول الجسيمات أو الذرات، لكن الإشعاع الكهرومغناطيسي، الذي يتضمن الضوء، لا بد من وصفه بمدلول الموجات. ولذا وجد أن الطريقة التي يتداخل بها الضوء والمادة تقدم أفضل فرصة لتوحيد الفيزياء في بداية القرن العشرين، وقد حدث أثناء محاولة وصف كيفية التداخل بين الإشعاع والمادة أن تحطمت الفيزياء الكلاسيكية التي نجحت تقريبًا في كل ما سبق.

وأبسط طرق مشاهدة (حرفيًّا) الكيفية التي تتداخل بها المادة مع الإشعاع هو النظر إلى جسم ساخن؛ يشع الجسم الساخن طاقة

كهرومغناطيسية، وكلما كان الجسم أسخن أطلق طاقة أكثر، بأطوال موجات أقصر (ترددات أعلى)، وهكذا فإن عصا النار الساخنة لدرجة الاحمرار تكون أبرد من تلك الساخنة لدرجة البياض. أما عصا النار الأبرد للدرجة التي لا يشع عندها ضوء مرئي فقد تكون دافئة لأنها تبعث بالأشعة تحت الحمراء منخفضة التردد. وحتى في نهاية القرن التاسع عشر كان واضحًا حتمية ارتباط الإشعاع الكهرومغناطيسي بحركة الشحنات الكهربية الدقيقة؛ كان الإلكترون قد اكتشف حديثًا في ذلك الوقت، لكن كان من السهل رؤية الكيفية التي يتذبذب بها جزء مشحون من ذرة (الذي نعرفه الآن على أنه إلكترون) للأمام وللخلف لينتج تيارًا من الموجات الكهرومغناطيسية، التي تشبه إلى حد ما الطريقة التي يمكنك بها صنع رقرقات الماء (في الحمام) بذبذبة إصبعك للأمام وللخلف، وكانت المشكلة أن أفضل النظريات الكلاسيكية — الميكانيكا الإحصائية والكهرومغناطيسية — تتنبأ بشكل من أشكال الإشعاع مختلف جدًّا عن النوع الذي جرت ملاحظة انبعاثه من الأجسام الساخنة.

لغز الجسم الأسود

وللتوصل إلى مثل هذه التنبؤات، استخدم النظريون، كعادتهم دائما، مثالًا نموذجيًّا خياليًّا، وهو في هذه الحالة ماص أو باعث للإشعاع، ويسمى مثل هذا الجسم «بالجسم الأسود» لأنه يمتص كل الإشعاع الذي يسقط عليه، وهو اختيار غير موفق للاسم، لأنه يتضح أن الجسم الأسود هو الأكثر كفاءة في تحويل الطاقة الحرارية إلى إشعاع كهرومغناطيسي — وبنفس السهولة يمكن للجسم الأسود أن يكون ساخنًا لدرجة الاحمرار أو البياض — وبشكل ما فإن سطح الشمس هو نفسه بالأحرى يعمل مثل جسم أسود، وعلى عكس المفاهيم النموذجية للنظريين، فإن من السهل مع ذلك عمل جسم أسود في المعمل: خذ كرة مجوفة أو أنبوبة مغلقة من طرفيها، واصنع بها ثقبًا صغيرًا في جانبها، فإذا دخل أي إشعاع، كضوء مثلًا، من خلال الثقب فإنه يكون قد دخل إلى مصيدة وسينعكس ويرتد من على الجدران حتى

يُمْتَصّ، ومن المستبعد أن يرتد الشعاع ليخرج من الثقب الذي دخل منه، وبذلك فإن الثقب يصبح في الواقع جسمًا أسود، ويعطي هذا الأمر الاسم الألماني البديل إشعاع الفجوة (التجويف).

إلا أننا مهتمون أكثر بما يحدث للجسم الأسود عند تسخينه وهو مثل عصا النار فهي ستسخن أولًا ثم تتوهج محمرة أو مبيضة حسب درجة حرارته، ومن الممكن دراسة طيف الإشعاع المنبعث — كمية الإشعاع عند كل طول موجة في المعمل بملاحظة ما يصدر عن الثقب الصغير الموجود في جانب الوعاء الساخن — وقد أظهرت مثل هذه الدراسات أن ذلك يعتمد فقط على درجة حرارة الجسم الأسود، وسيكون هناك القليل جدًّا من الإشعاع عند أطوال الموجات شديدة القصر (ترددات عالية)، والقليل جدًّا عند أطوال الموجات مفرطة الطول، أما معظم الطاقة المشعة فستقع في حزمة متوسطة من الترددات، وتزاح النهاية العظمى للطيف تجاه أطوال موجات أقصر كلما صار الجسم أسخن (من تحت الحمراء إلى الحمراء فالزرقاء ففوق البنفسجية). لكن لوحظ دائمًا وجود انقطاع في الطيف عند أطوال الموجات القصيرة جدًّا وهذا ما جعل قياسات إشعاع الجسم الأسود التي جرت في القرن التاسع عشر تتعارض مع النظرية.

وللغرابة، فإن أفضل التنبؤات تبعًا للنظرية الكلاسيكية، تؤكد أن التجويف المملوء بالإشعاع لا بد أن يحتوي على كمية لانهائية من الطاقة عند أقصر طول موجة، بدلًا من النهاية العظمى في طيف الجسم الأسود والانخفاض إلى الصفر عند طول موجة مساو للصفر، كان لا بد للقياسات أن تظهر عند طول موجة مساو للصفر ارتفاعًا خارج المقياس عند الطرف الخاص بالموجات القصيرة، وقد جاءت الحسابات من الافتراض الذي يبدو طبيعيًّا بأن موجات الإشعاع الكهرومغناطيسي في التجويف من الممكن التعامل معها بالطريقة نفسها مثل موجات الوتر، كأوتار الكمان، وأنه من الممكن أن توجد موجات من جميع الأحجام — أي طول موجة أو أي تردد — ولأن هناك الكثير جدًّا من أطوال الموجات (أنماط كثيرة من التذبذب) للتعامل معها، ولا بد من تطبيق قوانين الميكانيكا الإحصائية

باستعادتها من عالم الجسيمات إلى عالم الموجات للتنبؤ بالمظهر العام للإشعاع من التجويف، الأمر الذي يؤدي مباشرة إلى استنتاج أن الطاقة المشعة عند أي تردد تتناسب طرديًّا مع ذلك التردد، والتردد هو معكوس طول الموجة، وبذا فأطوال الموجات القصيرة جدًّا لها ترددات عالية، وعليه فإن كل إشعاعات الجسم الأسود لا بد أن تنتج كميات مهولة من الطاقة عالية التردد في المنطقة فوق البنفسجية وما بعدها؛ فكلما زاد التردد زادت الطاقة، ويطلق على هذا التنبؤ «الكارثة فوق البنفسجية»، وهى تظهر أنه لا بد من وجود خطأ ما في الافتراضات التي بنيت عليها هذه التنبؤات.

غير أنه ليس كل شيء خطأ، فعلى الجانب الخاص بالترددات المنخفضة في منحنى الجسم الأسود، تتفق المشاهدات بصورة جيدة جدًّا مع التنبؤات القائمة على النظرية الكلاسيكية، والمعروفة باسم قانون رايلي-جنيز Rayleigh-Jeans Law، وعلى الأقل تعتبر النظرية الكلاسيكية نصف صحيحة، ويكمن اللغز في السبب في أن طاقة التذبذب عند الترددات العالية ليست كبيرة، لكنها في الواقع تنقطع وتصبح صفرًا عندما تزداد ترددات الإشعاع.

وقد اجتذب هذا اللغز اهتمام كثير من الفيزيائيين في العقد الأخير للقرن التاسع عشر، وكان أحد هؤلاء الفيزيائيين هو ماكس بلانك Max Planck، عالم ألماني من المدرسة القديمة، كان بلانك في داخله محافظًا علميًّا وليس ثوريًّا ويعمل بعناية وجدية شديدة، وكان اهتمامه الخاص ينصب على الديناميكا الحرارية، وكان أمله الأكبر في ذلك الوقت أن يحل الكارثة فوق البنفسجية بتطبيق قواعد الديناميكا الحرارية، وفي أواخر العقد الأخير من القرن التاسع عشر كانت هناك معادلتان تقريبيتان، ومن المعروف أنهما يقدمان فيما بينهما تمثيلًا غير دقيق لطيف الجسم الأسود، وكانت نسخة مبكرة من قانون رايلي-جينز تعمل عند الموجات الطويلة، وكان ويلهلم فاين Wilhelm Wien قد طور صيغة تناسب تقريبًا المشاهدات عند الموجات القصيرة، وتنبأ أيضًا بطول الموجة التي تقع عندها النهاية العظمى في المنحنى عند أي درجة حرارة. بدأ بلانك بمتابعة الكيفية التي يشع بها

المذبذب الكهربي الصغير وميض الموجات الكهرومغناطيسية، وهي طريقة تختلف عما اتبعه رايلي في بداية القرن العشرين وجينز بعده بقليل، لكنها كانت الطريقة التي ينتج عنها بالضبط المنحنى القياسي الكامل بما في ذلك الكارثة فوق البنفسجية، وقد عمل بلانك من سنة ١٨٩٥ وحتى سنة ١٩٠٠ على هذه المشكلة ونشر عددًا من المقالات البحثية المؤثرة التي أرست العلاقة بين الديناميكا الحرارية والكهربية الديناميكية، لكنه لم يحل بعد لغز طيف الجسم الأسود. وسنة ١٩٠٠ أنجز فتحًا وتقدمًا مفاجئًا في الموضوع، ولم يكن ذلك نتيجة تفكير وبصيرة علمية هادئة ورائعة بل جاء ذلك نتيجة مزيج يائس من الحظ والبصيرة مع توفيق في الفهم الخاطئ لواحدة من الأدوات الرياضية التي استخدمها.

وطبيعي ألا يستطيع أحد اليوم أن يتأكد بصورة جازمة عما دار في ذهن بلانك عندما اتخذ الخطوة الثورية التي أدت إلى ظهور ميكانيكا الكم، لكن قام مارتن كلاين Martin Klein المؤرخ المتخصص في تاريخ الفيزياء، ودراسة أعمال بلانك بالتفصيل في الفترة التي شهدت مولد نظرية الكم. ويُعد إعادة ترتيب الأدوار التي لعبها بلانك وأينشتاين في هذا الميلاد تقريرًا موثقًا أصيلًا كأفضل ما يمكن الحصول عليه، وهو يضع الاكتشافات نفسها في سياقها التاريخى، ولا تدين أول خطوة اتخذت في نهاية صيف سنة ١٩٠٠ للحظ بأي شيء، لكنها جاءت فقط نتيجة بصيرة عالم فيزياء ورياضيات قد تدرب جيدًا؛ فقد أيقن بلانك أن الوصفين غير الكاملين لطيف الجسم الأسود يمكن ضمهما في صيغة رياضية واحدة بسيطة تصف شكل المنحنى كله، في الواقع استخدم القليل من الخداع الرياضي ليعبر الفجوة بين الصيغتين: قانون فاين وقانون رايلي-جنيز وكان ذلك نجاحًا كبيرًا. فقد توافقت معادلة بلانك بصورة رائعة مع مشاهدات إشعاع التجويف، لكنها على خلاف نصفي القانونين اللذين جاءت منهما، فإنها لا تقوم على أساس فيزيائي، وقد حاول كل من فاين ورايلى — بل وحتى بلانك في السنوات الأربع الأخيرة — بناء نظرية ابتداء من افتراضات فيزيائية محسوسة ليصلوا في النهاية إلى منحنى الجسم الأسود، والآن قام بلانك

بسحب المنحنى المضبوط من قبعته ولم يعرف أحد أي افتراضات فيزيائية كانت «تنتمي» لهذا المنحنى، وقد اتضح أنها لم تكن محسوسة بصورة جيدة على الإطلاق.

ثورة ليست موضع ترحيب

أُعلن عن معادلة بلانك في اجتماع للجمعية الفيزيائية في برلين في أكتوبر/ تشرين الأول ١٩٠٠، وعلى مدى الشهرين التاليين أغرق بلانك نفسه في مشكلة إيجاد أساس فيزيائي للقانون، محاولاً ذلك بتشابك افتراضات فيزيائية مختلفة ليرى أيها يناسب المعادلات الرياضية، وقد صرح فيما بعد بأن هذه الفترة كانت أكثر الفترات بذلًا للجهد والعمل في حياته كلها، وقد فشلت محاولاته العديدة إلى أن أصبح بلانك أخيرًا أمام بديل واحد فقط لا يلقى ترحيبًا عنده.

وقد وصفتُ بلانك على أنه فيزيائي من المدرسة القديمة، وكان كذلك بالفعل؛ فقد كان في أبحاثه المبكرة يكره تقبل الفرضية الجزيئية، وكان يكره على وجه الخصوص فكرة التفسير الإحصائي للخاصية المسماة أنتروبيه (Entropy)، وهى تفسير أدخله بولتزمان في علم الديناميكا الحرارية، والأنتروبيه دالة حاكمة في الفيزياء، وتتعلق في أساسها بعملية سريان الزمن، ومع أن القوانين البسيطة للميكانيكا — قوانين نيوتن — انعكاسية تمامًا إذا اعتبرنا الزمن، إلا أننا نعلم أن العالم الحقيقي ليس بهذا الشكل؛ فكر في إسقاط حجر على الأرض، فعندما يصطدم الحجر بالأرض تتحول طاقة حركته إلى حرارة، لكن إذا وضعنا حجرًا مماثلًا على الأرض وسخناه بنفس المقدار، فإنه لن يقفز في الهواء، ولماذا لا يقفز؟ في حالة الحجر الذي يسقط على الأرض تتحول صورة مرتبة من الحركة (كل الذرات والجزيئات تسقط في نفس الاتجاه) إلى صورة غير مرتبة (عديمة الترتيب) من الحركة (كل الذرات والجزيئات تتدافع بعضها مع بعض بطاقة عشوائية). ويتفق ذلك مع أحد قوانين الطبيعة الذي يبدو أنه يتطلب أن يزداد عدم الترتيب

باستمرار، ويعرف عدم الترتيب في هذا المعنى بالأنتروبيه، والقانون هو القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وينص على أن العمليات الطبيعية تتجه دائمًا نحو زيادة عدم الترتيب، أو تزداد الأنتروبيه باستمرار، فإذا وضعت طاقة حرارية عديمة الترتيب في حجر، فإنه في هذه الحالة لا يستطيع استخدام هذه الطاقة ليخلق حركة مرتبة لكل الجزئيات في الحجر لتقفز جميعها إلى أعلى معًا.

أم ترى من الممكن ذلك؟ أدخل بولتزمان أحد التنويعات في هذا الموضوع. قال بولتزمان إن مثل هذا الحدث المتميز قد يحدث، لكنه بعيد الاحتمال جدًّا، وبالطريقة نفسها، وكنتيجة للحركة العشوائية لجزيئات الهواء، فمن الممكن أن يتركز كل هواء الغرفة فجأة في الأركان (لا بد أن يوجد أكثر من ركن لأن الجزئيات تتحرك في فراغ ثلاثي الأبعاد)، لكن حدوث ذلك أمر بعيد الاحتمال جدًّا هو الآخر، لدرجة أنه يمكن إهماله في الأمور العملية. كان بلانك يجادل طويلًا وبعنف ضد هذا التفسير الإحصائي للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، علنًا وفي مراسلاته مع بولتزمان؛ فقد كان القانون الثاني بالنسبة إليه قانونًا مطلقًا، ولا بد أن تزداد الأنتروبيه، بلا تدخل من الاحتمالات في ذلك، لذلك من السهل أن ندرك كيف أحس بلانك قرب نهاية العقد الأول من القرن العشرين عندما استهلك كل الاحتمالات، ثم حاول على مضض أن يقحم نسخة بولتزمان المعدلة إحصائيًّا للديناميكا الحرارية في حساباته لطيف الجسم الأسود، وتبين له أنها تصلح لذلك. ويزداد الوضع مع ذلك سخرية وإثارة عندما نعرف الحقيقة؛ فلأن بلانك ليس معتادًا على معادلات بولتزمان، فإنه طَبَّقَ بطريقة غير منتظمة فحصل بلانك على الإجابة الصحيحة، لكن بطريق الخطأ، ولم تتضح قيمة ومغزى أبحاث بلانك إلا على يد أينشتاين الذي تولى توضيح الفكرة.

ومن الأمور التي تستحق التأكيد عليها الخطوة الكبرى للأمام في العلوم التي خطاها بلانك ليرسي تفسير بولتزمان الإحصائي لزيادة الأنتروبيه كأفضل وصف للواقع، وتبعًا لأعمال بلانك، لا يمكن في الواقع الشك أبدًا أن الأنتروبيه تزداد، وهى عالية الاحتمال لكنها لا يمكن أن تؤخذ كيقين مطلق، ولهذا الأمر

تضمين مهم في علم الكون، وهو علم دراسة العالم ككل، حيث نتعامل مع امتدادات شاسعة للزمان والفضاء؛ فكلما اتسع النطاق الذي نتعامل معه زادت فرص حدوث الأشياء بعيدة الاحتمال في موقع ما وفي زمن ما داخل هذا النطاق، بل إنه حتى من المحتمل (مع أن ذلك لا يزال بعيد الاحتمال) أن يمثل العالم كله، وهو مكان مرتب على العموم نوعًا من التأرجحات الإحصائية الديناميكية الحرارية في غاية الضخامة، مثل فُوَاق (زُغُطّة) نادر جدًا، أدى إلى نشوء منطقة منخفضة الأنتروبية، وهي تندفع الآن إلى أسفل، وقد أوضح «خطأ» بلانك مع ذلك، أمرًا ما من أكثر الأمور في طبيعة العالم.

تضمنت معالجة بولتزمان الإحصائية للديناميكا الحرارية تقطيع الطاقة إلى قطع صغيرة رياضيًّا، والتعامل مع هذه القطع على أنها كميات حقيقية يمكن التعامل معها بواسطة معادلات الاحتمالات، ويجب إعادة تجميع قطع الطاقة التي قُطِّعَت قبل هذا الجزء من الحسابات، (أو تكاملها) في مرحلة متأخرة للحصول على الطاقة الكلية؛ الطاقة المقابلة لإشعاع الجسم الأسود في هذه الحالة، وفي منتصف الطريق أثناء هذه الإجراءات أيقن بلانك أنه قد حصل بالفعل على الصيغة الرياضية التي كان يبحث عنها، وقبل أن يصل إلى مرحلة تكامل قطع الطاقة ليحصل على الطاقة الكلية المستمرة، كانت معادلة الجسم الأسود هناك قابعة في الرياضيات، وهكذا أخذها بلانك، وكانت تلك خطوة عنيفة وغير مبررة بالمرة في سياق الفيزياء الكلاسيكية.

ولو بدأ أي عالم فيزيائي كلاسيكي جيد المستوى بمعادلات بولتزمان ليتوصل إلى صيغة لإشعاع الجسم الأسود لكان قد أتم التكامل، وعندئذ، كما بين أينشتاين فيما بعد، فإن إضافة قطع الطاقة إلى بعضها كان سيؤدي إلى استعادة الكارثة فوق البنفسجية فعلاً، وأشار أينشتاين إلى أن أي تعامل كلاسيكي مع المشكلة سيؤدي حتمًا إلى هذه الكارثة، ولأن بلانك فقط كان يعرف الإجابة التي يبحث عنها، فقد كان قادرًا على إيقاف الحل الكامل، الذي بدأ سليمًا كحل كلاسيكي للمعادلة، قبل نهايته. ونتيجة لذلك وجد نفسه وحيدًا مع قطع من الطاقة لا بد من تفسير لها، وقد فسر بلانك هذا التقسيم الظاهر للطاقة الكهرومغناطيسية إلى قطع مفردة بأن المذبذب

الكهربي داخل الذرة يستطيع أن يبعث أو يمتص الطاقة على شكل قطع من أحجام معينة، تسمى الكوانتا (الكم)، وبدلًا من تقسيم الكمية المتاحة من الطاقة بعدد لانهائي من الطرق، فإنها يمكن أن تقسم فقط إلى عدد محدد من القطع بين المذبذات وأن طاقة قطعة مثل هذه (E) لا بد أن تعتمد على ترددها (ويرمز له بالحرف الإغريقي نيو ν) تبعا للصيغة الجديدة

$$E = h\nu,$$

حيث h ثابت جديد يسمى الآن ثابت بلانك.

ما هو h؟

من السهل رؤية الكيفية التي حلت بها هذه المعالجة الكارثة فوق البنفسجية؛ عند الترددات المرتفعة جدًّا، تكون الطاقة اللازمة لإطلاق كوانتم واحد من الإشعاع كبيرة جدًّا، ولن يملك مثل هذه الطاقة الكبيرة إلا عدد قليل من المذبذبات (تبعًا للمعادلات الإحصائية) وبذلك لن يبعث إلا بعدد قليل من الكوانتات عالية الطاقة، أما عند الترددات المنخفضة جدًّا (أطوال الموجات الطويلة) فتنبعث أعداد كبيرة من الكوانتات منخفضة الطاقة، ولأن كل واحد منها لا يملك إلا طاقة ضئيلة للغاية فإن مجموعها إذا أضيف بعضها إلى بعض لا يبلغ قيمة تذكر، ولا توجد أعداد وفيرة في المذبذبات إلا في المدى الأوسط من الترددات، وهي تملك بذلك طاقة كافية تسمح لها ببث قطع متوسطة الحجم منها والتي يضاف بعضها لبعض لينتج عنها النهاية العظمى الموجودة على منحنى الجسم الأسود.

غير أن إعلان اكتشاف بلانك سنة ١٩٠٠ قد آثار من الأسئلة أكثر مما أجاب عنه، وفشل في إشعال وإثارة عالم الفيزياء حينئذ، وليست المقالات العلمية المبكرة الخاصة ببلانك عن نظرية الكم نموذجية في الوضوح (وربما تعكس الطريقة المضطربة التي أجبر على إقحامها في الديناميكا الحرارية المحببة له). وعلى مدى فترة طويلة كان كثير من الفيزيائيين، بل معظمهم — الذين على علم بأبحاثه — ينظرون إليها على أنها ببساطة حيلة

رياضية، وترتيب معين للتخلص من الكارثة فوق البنفسجية، وليس لها سوى القليل من المغزى الفيزيائي، بل حتى ليس لها منه شيء، وبالتأكيد كان بلانك نفسه مشوشًا، وقد كتب في أحد خطاباته إلى روبرت وليم وود (Robert William Wood) سنة ١٩٣١ ملقيًا نظرة على أعماله سنة ١٩٠٠ قائلًا: «يمكن أن أشخص كل العملية على أنها عمل يائس ... ولا بد من إيجاد تفسير نظري بأي ثمن،* مهما كان هذا الثمن.» لكنه كان يعلم أنه قد تعثر في شيء ذي مغزى، وتبعًا لهايزنبرج فإن ابن بلانك قد أخبره أن والده وصف له عمله في تلك الفترة وشرح له كيف أن هذا الاكتشاف قد يرقى لمرتبة اكتشافات نيوتن،† وذلك أثناء تجولهما طويلًا في جرونولد من ضواحي برلين.

انشغل الفيزيائيون في العقد الأول من القرن العشرين في استيعاب الاكتشافات الجديدة التي تضمنت الإشعاع الذري ولا يبدو أن «الحيلة الرياضية» الجديدة لبلانك في تفسير منحنى الجسم الأسود كانت ذات أهمية طاغية مقارنة بهذه الاكتشافات، وقد استغرق الأمر حتى سنة ١٩١٨ ليحصل بلانك على جائزة نوبل عن أبحاثه، وهي فترة طويلة إذا قورنت بالسرعة التي جرى الاعتراف فيها بأعمال آل كوري ورذرفورد. (يرجع ذلك جزئيًّا لأن الاعتراف بالتقدم النظري المفاجئ والعاصف يستغرق وقتًا أطول، فالنظرية الجديدة ليست محسوسة مثل جسيمة جديدة، أو أشعة X، وعليها أن تواجه اختبار الزمن والتجارب التأكيدية قبل أن تحصل على الاعتراف الكامل.) وهناك كذلك شيء ما غير عادي لثابت بلانك الجديد h. فهو ثابت صغير جدًّا ٦٫٦ × ١٠^-٣٤^ جول ثانية، ولا يمثل ذلك أي لغز لأنه لو كان أكبر كثيرًا لجرى التعرف عليه قبل أن يبدأ الفيزيائيون في حل لغز إشعاع الجسم الأسود بمدة طويلة. كلا، والغريب في الأمر أن وحدات قياس h هي الطاقة (بالإرج ergs) مضروبة في الزمن (بالثواني). وتسمى مثل هذه الوحدات الفعل أو الأثر Actions، ولم تكن سمة عادية من سمات

* استشهد بها ميهرا وريتشنبرج (Mehra & Rechenberg) الجزء الأول.

† راجع الفيزياء والفلسفة Physics and philosophy، صفحة ٣٥.

الميكانيكا الكلاسيكية؛ فليس هناك «قانون الحفاظ على الفعل» ليقف على قدم المساواة مع قانون الحفاظ على الكتلة أو الطاقة، لكن للفعل خاصية مثيرة بالذات، وهي مشتركة ضمن أشياء أخرى، مع خاصية الأنتروبية. فالفعل الثابت هو ثابت مطلق وله نفس الحجم لكل المشاهدين في الزمان والمكان، وهو ثابت رباعي الأبعاد، ولم يتضح مغزى ذلك إلا عندما كشف أينشتاين النقاب عن نظريته النسبية فقط.

وحيث إن أينشتاين هو اللاعب التالي الذي سيدخل إلى مسرح ميكانيكا الكم، فقد يستحق الأمر أن نتحول قليلًا إليه لنرى ما الذي يعنيه ذلك. تتعامل نظرية النسبية الخاصة مع ثلاثة أبعاد فضائية وبعد واحد زماني ككل رباعي الأبعاد، ويقع المشاهدون الذين يتحركون في الفضاء بسرعات مختلفة على مناظر مختلفة للأشياء وهم لن يتفقوا مثلًا على طول عصا يقيسونه أثناء عبورها بجوارهم، ويمكن تخيل أن العصا موجودة في أربعة أبعاد، وتتحرك «خلال» الزمن لتصنع سطحًا لمستطيل فائق ارتفاعه طول العصا وعرضه كمية الزمن الذي قطعته، و«مساحة» هذا المستطيل تقاس بوحدات الطول × الزمن، وستصبح المساحة هي نفسها لجميع المشاهدين الذين يقيسونها، مع اختلافهم حول قيم الطول والزمن، وبالطريقة نفسها فإن الفعل (الطاقة × الزمن) هو مكافئ رباعي الأبعاد من الطاقة، ويكون الفعل هو نفسه لكل المشاهدين حتى وإن اختلفوا حول حجم الطاقة والزمن المكونين للفعل، وهناك قانون للحفاظ على الفعل في النسبية الخاصة، وهو في أهمية قانون الحفاظ على الطاقة تمامًا، وكان ثابت بلانك فقط هو الذي يبدو غريبًا لأنه اكتشف قبل النظرية النسبية.

وربما يؤكد ذلك على الطبيعة الشاملة للفيزياء، وتبدو النسبية الخاصة مختلفة بين المساهمات العلمية الثلاث لأينشتاين والمنشورة سنة ١٩٠٥ وهى عن الحركة البراونية والظاهرة الفوتوكهربية. لكن كلها ترتبط معًا بإطار من الفيزياء النظرية، ومع ذيوع الصيت الذي جلبته النظرية النسبية فإن أعظم مساهمات أينشتاين العلمية هي أبحاثه حول نظرية الكم التي خرجت من أبحاث بلانك عن طريق الظاهرة الفوتوكهربية.

كانت السمة الثورية لأبحاث بلانك سنة ١٩٠٠ هي أنها أظهرت قصور الفيزياء الكلاسيكية، وليس مهمًّا بالضبط ما هي أوجه القصور، ومجرد حقيقة وجود ظواهر لا يمكن تفسيرها بأفكار مبنية على أعمال نيوتن فقط كانت كافية للتبشير بعصر جديد في الفيزياء. كانت الصورة الأصلية لأبحاث بلانك، مع ذلك محددة أكثر كثيرًا مما تبدو عليه في الكتابات الحديثة، وهناك مدرسة في كتابة المغامرات تجعل البطل يفلت من المواقف التي تحبس الأنفاس في نهاية كل حلقة بشكل إعجازي، فيما يمكن إيجازه في العبارة: «تحرر جاك بقفزة واحدة.» ويمكن قراءة مولد ميكانيكا الكم في العديد من الكتابات العلمية على أنها قفزة واحدة لجاك؛ «وصلت الفيزياء الكلاسيكية في نهاية القرن التاسع عشر إلى طريق مسدود (في مواجهة الجدار). وفي قفزة واحدة اخترع بلانك الكم، وتحررت الفيزياء.» لكن بعيدًا عن ذلك لم يقترح بلانك سوى أن المذبذبات الكهربية داخل الذرة قد تكون مكنتمة فقط، وكان يعنى بذلك أن هذه المذبذبات تستطيع أن تبعث فقط بحزم من الطاقة ذات أحجام معينة، لأن هناك شيئًا بداخلها يمنعها من امتصاص أو إشعاع كميات من الإشعاع، «بين تلك الكميات».

ويعمل الصراف الآلي في البنك الذي أتعامل معه في لندن بالطريقة نفسها تقريبًا؛ فعندما أدخل بطاقة الصرف ستناولني الماكينة أي مبلغ أرغب فيه، بشرط أن يكون من مضاعفات ٥ جنيهات وليس كميات فيما بين ذلك (ولا يستطيع منح ما هو أقل من ٥ جنيهات استرليني)، ولا يعني ذلك أن القيم البينية مثل ٨,٤٧ جنيهًا استرليني لا توجد. ولذا فإن بلانك نفسه لم يقترح أن الإشعاع مكنتم، وكان يبدو دائما أنه على حذر من التضمينات الأعمق لنظرية الكم. وفي السنوات التالية، ومع تقدم نظرية الكم ساهم بلانك في العلم الذي أسسه، لكنه أنفق معظم حياته العلمية محاولًا التوفيق بين الأفكار الجديدة والفيزياء الكلاسيكية، ولم يكن الأمر أنه قد غير رأيه، لكنه لم يعترف أبدًا، في المقام الأول، بمدى ابتعاد معادلة الجسم الأسود عن الفيزياء الكلاسيكية؛ فقد توصل إلى المعادلة عن طريق

تزاوج الديناميكا الحرارية مع الديناميكا الكهربية، وكلاهما من النظريات الكلاسيكية. وبدلًا من اعتناق مذهب آخر كانت جهود بلانك لإيجاد مكان وسط بين أفكار الكوانتم والنظريات الكلاسيكية، تمثل في الواقع حيودًا مدويًا، بالنسبة إليه، بعيدًا عن الأفكار الكلاسيكية التي شب عليها، غير أن أساسياته في الأفكار الكلاسيكية كانت شاملة للدرجة التي لا يفاجئنا فيها أن التقدم الحقيقي قد تم على يد جيل جديد من الفيزيائيين الذين لم يتوطد موقفهم بعد والذين هم أقل التزامًا بالأفكار القديمة، والذين اشتعل حماسهم بالاكتشافات الجديدة في الإشعاع الذري وكانوا يبحثون عن إجابات جديدة لكل من الأسئلة القديمة والأسئلة الجديدة.

أينشتاين والضوء والكوانتا

كان أينشتاين في الواحد والعشرين من عمره في مارس/آذار سنة ١٩٠٠. وقد تقلد وظيفته الشهيرة في مكتب الاختراعات السويسري في صيف سنة ١٩٠٢، وقد كرس معظم اهتماماته العلمية في تلك السنوات الأولى من القرن العشرين لمشاكل الديناميكا الحرارية والميكانيكا الإحصائية، وكانت أولى المقالات (العلمية) المنشورة له تقليدية في الأسلوب وفي المسائل التي عالجتها، كما هو الحال في الجيل السابق بمن في ذلك بلانك؛ فنجد أنه في أول بحث نشره وأشار فيه إلى أفكار بلانك حول طيف الجسم الأسود (نشر سنة ١٩٠٤)، قام أينشتاين بتمهيد أرض جديدة وطور أسلوبًا لحل الألغاز الفيزيائية خاصًا به وحده، ويضيف كلاين كيف أن أينشتاين كان أول شخص يأخذ التضمينات الفيزيائية لأبحاث بلانك بجدية ويتعامل معها على أنها أكثر من حيلة رياضية،* وقد أدى تقبل المعادلات على أن لها أساسًا في

* راجع مساهمات كلاين في «بعض الغرابة في التناسب» (Some Strangeness in the proportion) تحرير هاري وولف وفي الجزء نفسه يذهب توماس كوهن من MIT أبعد من معظم المسئولين الذين دفعوا بأن بلانك «لم يكن لديه مفهوم عن تقطيع طيف الطاقة عندما قدم أول إثبات لقانون التوزيع للجسم الأسود»، وكان أول من رحب بـ«الدور الأساسي للكنتمة في نظرية الجسم الأسود» يقول كوهين إن «أينشتاين بالأحرى وليس بلانك هو أول من كنتم مذبذب بلانك.» ويمكننا ترك هذا الجدل للأكاديميين، إلا أنه لا شك في أن مساهمات أينشتاين كانت في غاية الفعالية في تطوير نظرية الكم.

الواقع الفيزيائي، خلال عام واحد، إلى بصيرة درامية جديدة، وهى إعادة إحياء نظرية الجسيمات للضوء.

والنقطة الثانية التي كانت قفزة سنة ١٩٠٤ مثل أعمال بلانك، هي دراسة الظاهرة الفوتوكهربية بواسطة فيليب لينارد (Phillip Lenard) وج. ج. طومسون (J. J. Thomson)، اللذين عملا مستقلين أحدهما عن الآخر في نهاية القرن التاسع عشر. ولد لينارد سنة ١٨٦٢ في الجزء من المجر الذي أصبح الآن في تشيكوسلوفاكيا وحصل على جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٠٥ عن أبحاثه على أشعة الكاثود، وقد أثبت أثناء هذه الأبحاث سنة ١٨٩٩ أن أشعة الكاثود (الإلكترونات) يمكن أن تتولد بسقوط الضوء على سطح فلز في الفراغ، وتتسبب طاقة الضوء بطريقة أو بأخرى في جعل الإلكترونات تقفز خارج الفلز.

تضمنت تجارب لينارد استخدام أشعة ضوء أحادي اللون (مونوكروماتي Monochromatic)، بمعنى أن كل موجات الضوء لها التردد نفسه، وقد فحص الكيفية التي تؤثر بها شدة الضوء على الطريقة التي تنطلق بها الإلكترونات خارج الفلز، ووجد نتيجة مفاجئة؛ باستخدام ضوء أشد إضاءة (كان في الواقع يحرك مصدر الضوء ليقترب أكثر من سطح الفلز ليحدث التأثير نفسه) تسقط طاقة أكثر على كل سنتيمتر مربع من سطح الفلز، وإذا امتص الإلكترون طاقة أكثر فإنه سينطلق خارجًا من الفلز طائرًا بسرعة أكبر، غير أن لينارد قد اكتشف أنه مادام طول الموجة يظل ثابتًا فإن الإلكترونات تنطلق بالسرعة نفسها وبتحريك مصدر الضوء أقرب إلى الفلز ينطلق عدد أكبر من الإلكترونات، لكن انطلاق كل إلكترون منها سيحدث بالسرعة نفسها التي تنطلق بها الإلكترونات نتيجة سقوط شعاع ضوء أضعف لكن من اللون نفسه، ومن جهة أخرى تتحرك الإلكترونات أسرع عندما يستخدم شعاع ضوء ذو تردد أعلى — من الأشعة فوق البنفسجية مثلًا — بدلًا من الأشعة الزرقاء أو الحمراء.

وتوجد طريقة بسيطة جدًا لشرح ذلك، بشرط أن تكون مستعدًا لأن تهجر أفكار الفيزياء الكلاسيكية المتأصلة فيك، وأن تأخذ معادلات بلانك

على أنها ذات معنى فيزيائي شامل، وتتضح أهمية هذه الشروط من حقيقة أنه لم يتخذ أي شخص هذه الخطوة التي تبدو بسيطة على مدى السنوات الخمس التي أعقبت أبحاث لينارد الأولى على الظاهرة الفوتوكهربية وتقديم بلانك لمفهوم الكوانتم، وحقيقة كان كل ما فعله أينشتاين هو تطبيق المعادلة $E = h\nu$ على الإشعاع الكهرومغناطيسي، بدلًا من تطبيقها على المذبذبات الصغرى داخل الذرة، قال أينشتاين أن الضوء ليس موجة مستمرة — كما كان يعتقد العلماء على مدى مائة سنة — وبدلًا من ذلك يجيء في حزم محددة أو كوانتات، ويجيء كل الضوء ذو التردد المحدد ν، أي الذي له لون محدد في حزم لها الطاقة نفسها E، وفي كل مرة يصطدم فيها واحد من هذه الكوانتات بإلكترون، تمنحه الكمية نفسها من الطاقة والسرعة نفسها ويعني الضوء الأكثر شدة أن هناك المزيد من الكوانتات الضوئية (وندعوها اليوم فوتونات) لها جميعًا الطاقة نفسها، لكن تغيير لون الضوء يغير من ترددها، وهكذا يغير من كمية الطاقة التي يحملها كل فوتون.

كان ذلك هو البحث الذي حصل بموجبه أينشتاين في النهاية على جائزة نوبل سنة ١٩٢١. ومرة أخرى، كان لا بد للإنجاز النظري أن ينتظر الاعتراف الكامل به، ولم تكتسب فكرة الفوتونات تقبلًا لحظيًّا، ومع أن تجارب لينارد اتفقت مع النظرية بشكل عام، فإن الأمر قد استغرق أكثر من عقد للتنبؤ الدقيق بالعلاقة بين سرعة الإلكترونات وطول موجة الضوء واختبارها وإثباتها. وقد أنجز التجريبي الأمريكي روبرت ميليكان Robert Millikan ذلك، وهو الذي أرسى طريقة في غاية الدقة لقياس قيمة h، ثابت بلانك، وقد حصل ميليكان سنة ١٩٢٣ على جائزة نوبل في الفيزياء عن هذه الأبحاث ولدقة قياساته لشحنة الإلكترون.

وهكذا انشغل أينشتاين عامًا كاملًا فهناك البحث الذي أدى إلى جائزة نوبل، وبحث آخر أكد للجميع في النهاية واقعية الذرات، وبحث ثالث شهد ميلاد النظرية التي أصبح يعرف بها أينشتاين؛ النسبية. وفي الوقت نفسه من عام ١٩٠٥، وبشكل طارئ كان أينشتاين على وشك استكمال قطعة صغيرة أخرى من أبحاثه تتعلق بحجم الجزيئات، التي قدمها لنيل الدكتوراه

من جامعة زيوريخ، وقد منح درجة الدكتوراه سنة ١٩٠٦، ومع أن درجة الدكتوراه لم تكن هي مفتاح الحياة العلمية الفعالة كما هو الحال اليوم، إلا أنه من الملفت للنظر أن الأبحاث الثلاثة التي نشرت سنة ١٩٠٥ قد نشرها رجل لم يكن يستطيع التوقيع في ذلك الوقت إلا بلقب مستر ألبرت أينشتاين.

استمر أينشتاين في السنوات القليلة التالية في العمل على دمج نظرية الكوانتم لبلانك في مجالات أخرى من الفيزياء، وقد وجد أن الفكرة تشرح (تفسر) الألغاز التي صمدت طويلًا والمتعلقة بنظرية الحرارة النوعية (الحرارة النوعية لمادة ما هي كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة كمية ثابتة من المادة درجة حرارة واحدة تُخْتار، وهى تعتمد على الطريقة التي تتذبذب بها الذرات داخل المادة، وقد اتضح أن هذه الذبذبات مكنتمة). وهذه المنطقة من أعمال أينشتاين هي الأقل إثارة وسحرًا، وعادة ما تغفل عنها الكتابات التي تتناول أبحاث أينشتاين، إلا أن نظرية الكم للمادة قد حظيت بالقبول أسرع كثيرًا من نظرية أينشتاين المماثلة للإشعاع وبدأت تقنع الكثير من الفيزيائيين من أتباع المدرسة القديمة بأنه يجب أخذ الأفكار الكمية بجدية، قام أينشتاين بتنقيح أفكاره حول الإشعاع الكمي على مدى السنوات التالية وحتى سنة ١٩١١، وأرسى فكرة أن البنية الكمية للضوء تضمين حتمي لمعادلة بلانك، وأشار أثناء ذلك إلى عالم علمي لم يتفتح بعد يضم فهمًا أفضل للضوء على أساس دمج نظريتي الموجات والجسيمات اللتين عاشتا جنبًا إلى جنب منذ القرن السابع عشر، وفي عام ١٩١١ تحولت أفكاره ناحية أمور أخرى؛ فقد أقنع نفسه بحقيقة الكوانتا، ولم يكن يهمه سوى أفكاره الشخصية. كانت مشكلة الجاذبية هي اهتمامه الجديد، وعلى مدى السنوات الخمس التالية حتى سنة ١٩١٦ طور نظريته: النظرية النسبية العامة، أعظم أعماله على الإطلاق، وقد استغرق الأمر حتى سنة ١٩٢٣ لإرساء واقعية الطبيعة الكمية للضوء دون أي شك، وقد أدى ذلك بدوره إلى جدال جديد حول الجسيمات والموجات، وقد ساعد ذلك في تحويل نظرية الكم والأخذ بيدها لتصبح النسخة الحديثة، ميكانيكا الكم، وقد حلت

كثير من تلك الأفكار محل القديمة. جاء أول ازدهار لنظرية الكم في العقد الذي أدار فيه أينشتاين وجهه عن الموضوع وركز اهتماماته على أمور أخرى، وقد جاء هذا الازدهار من دمج هذه الأفكار مع نموذج رذرفورد للذرة، وجاءت خصوصًا نتيجة لأعمال العالم الدانمركي نيلز بور، الذي كان يعمل مع رذرفورد في مانشستر. بعد أن وضع بور النموذج الخاص به للذرة لم يستطع بعدها أن يشكك في قيمة نظرية الكم كوصف للعالم الفيزيائي في المستوى الصغير جدًا.

الفصل الرابع

ذرة بور

بحلول عام ١٩١٢ كانت قطع اللغز الذري جاهزة للتركيب مع بعضها؛ فقد أرسى أينشتاين صحة فكرة الكوانتا على نطاق واسع، وأدخل فكرة الفوتون مع أنها لم تكن مقبولة بشكل عام بعد. وجعل أينشتاين فكرة الصراف الآلي تنسحب على الطاقة التي قال عنها أينشتاين إنها تجيء فقط على شكل حزم من قيم محددة (يتعامل الصراف الآلي فقط بوحدات من مضاعفات ٥ جنيهات استرلينية لأنها أصغر فئات العملة، وليس بسبب نزوة الشخص الذي برمج الآلة). توصل رذرفورد إلى صورة جديدة للذرة، لها نواة مركزية صغيرة تحيط بها سحابة من الإلكترونات، وكان لا بد لهذه الفكرة أن تكتسب الدعم اللازم لها، وببساطة لا يمكن لذرة رذرفورد مع ذلك أن تكون مستقرة، تبعًا للقوانين الكلاسيكية للديناميكا الكهربية. كان الحل في استخدام قواعد الكوانتم لوصف سلوك الإلكترونات في الذرة، ومرة أخرى جاء التطور المفاجئ من باحث شاب عنده طريقة جديدة للتعامل مع المشكلة، وهو ما تكرر بصورة مستمرة خلال قصة تطور نظرية الكم.

كان نيلز بور فيزيائيًّا دانمركيًّا قد أكمل رسالة الدكتوراه في صيف ١٩١١ وتوجه إلى كمبريدج في سبتمبر/أيلول من العام نفسه ليعمل مع ج. ج. طومسون في معامل كافندش؛ كان باحثًا صغيرًا جدًا وخجولًا ويتحدث الإنجليزية بطريقة غير سليمة، وقد اكتشف أنه من الصعب عليه إيجاد موقع ملائم في كمبريدج. وأثناء زيارته لمانشستر التقى برذرفورد واكتشف

أنه من السهل التعامل معه وقد أبدى رذرفورد اهتمامًا ببور وأبحاثه. ولذلك انتقل بور في مارس/آذار ١٩١٢ إلى مانشستر ليبدأ العمل ضمن فريق رذرفورد مرَكِّزًا أبحاثه على لغز بنية الذرة.* عاد بور إلى كوبنهاجن بعد ستة أشهر ولفترة قصيرة، وظل مرتبطًا بمجموعة رذرفورد في مانشستر حتى سنة ١٩١٦.

الإلكترونات القافزة

كان بور يمتلك عبقرية خاصة، وكانت بالضبط هي الشيء المطلوب لصنع التقدم في الفيزياء الذرية على مدى سنوات تالية من عشر إلى خمس عشرة. لم يكن بور يهتم بشرح كل التفاصيل في النظرية الشاملة لكنه كان يرحب بالتوفيق بين الأفكار المختلفة ليصنع نموذجًا تخيليًّا يعمل بصورة تتفق ولو بالتقريب مع مشاهدات الذرات الحقيقية، وبمجرد تكون فكرة ولو قريبة عما يجري، كان يستطيع أن يصنع من ذلك، ولو بطريقة غير بارعة، ما يجعل القطع يناسب بعضها بعضًا ببراعة أكثر، وبهذه الطريقة كان يعمل في اتجاه الحصول على صورة أكثر اكتمالًا. وهكذا أخذ بور صورة الذرة التي على شكل مجموعة شمسية صغيرة تتحرك بها الإلكترونات في مدارات تبعًا لقوانين الميكانيكا الكلاسيكية والكهرومغناطيسية، وقال إن الإلكترونات لا يمكنها أن تغادر تلك المدارات إلى الداخل وتبث إشعاعًا أثناء ذلك، ذلك لأنه مسموح لها فقط ببث قطع كاملة من الطاقة — كوانتا كاملة — وليس إشعاعًا مستمرًّا كما تتطلب النظرية الكلاسيكية، ويقابل المدارات «المستقرة» للإلكترونات كميات معينة من الطاقة، كل واحدة منها مضاعفات لكوانتم أساسية، ولا توجد مدارات في الوسط لأنها بذلك ستتطلب كسورًا من كميات الطاقة، وبالتشابه مع المجموعة الشمسية، فإن ذلك مثل

* تقول إحدى الروايات إن الانتقال كان نتيجة لعدم الاتفاق بين بور وطومسون حول النموذج ذريالذري لطومسون، الذي لم يعجب بور، وأن ج. ج. اقترح بهدوء أنه ربما كان رذرفورد أكثر تقبلًا لأفكار بور. راجع ى. يو. كوندون (E. U. Condon)، اقتباس ماكس جامر (Max Jammer) من صفحة ٦٩ من: التطور المفهومي لميكانيكا الكم (The Conceptual Development of Quantum Mechanics).

القول إن مدار الأرض حول الشمس مستقر وكذلك مدار المريخ، وأنه لا يوجد مدار آخر مستقر في مكان ما بينهما.

وما فعله بور لم يكن يصلح؛ فالفكرة كلها حول المدار تقوم على الفيزياء الكلاسيكية، أما فكرة حالة الإلكترونات التي تقابل كميات محددة من الطاقة — مستويات الطاقة، كما أصبحت تدعى — فتأتي من نظرية الكم، ولم يكن لنموذج الذرة المصنوع بلصق (ترقيع) قطع من النظرية الكلاسيكية مع قطع من نظرية الكم معًا، أن يقدم منظورًا حقيقيًّا عمّا يسِمُ الذرات، لكنه قدم بالفعل لبور ما يكفي من نموذج للعمل ساعد في تقدمه. وقد اتضح فيما بعد أن نموذجه كان على خطأ في كل شيء تقريبًا، لكنه قدم شيئًا انتقاليًّا أصيلًا لنظرية الكم للذرة، وكان بذلك لا يقدر بثمن، ولسوء الحظ فإن هذا النموذج ظل قائما حتى بعد هجره والترحيب برحيله ليس على صفحات النشر العلمي فقط بل حتى في كثير من المراجع المدرسية والجامعية، وذلك بسبب الخلطة الرائعة والبسيطة للأفكار الكمية والكلاسيكية. وإذا كنت قد تعلمت أي شيء عن الذرة في المدرسة، فإنني متأكد أن ذلك كان عن نموذج بور، سواء كان يحمل هذا الاسم أم لا يحمله، ولن أطلب منك أن تنسي كل شيء أخبروك به، لكن عليك أن تعدَّ نفسك للاقتناع بأن ذلك لم يكن كل الحقيقة، وعليك أن تحاول نسيان فكرة أن الإلكترونات «كواكب» صغيرة تدور حول النواة — كانت تلك فكرة بور في البداية، لكنها فكرة مضللة — فالإلكترون هو شيء ما يقبع خارج النواة ويمتلك كمية معينة من الطاقة وبعض الصفات الأخرى، ويتحرك بصورة غامضة كما سنرى.

كان النصر المبكر العظيم لأعمال بور سنة ١٩١٣ يكمن في النجاح الذي فسر به طيف ضوء الهيدروجين، أبسط الذرات. ويأخذ علم الطيف بداياته منذ السنوات الأولى للقرن التاسع عشر عندما اكتشف ويلم وولاستون (William Wollaston) خطوطًا داكنة في طيف الضوء القادم من الشمس، غير أنه يدين لأبحاث بور فقط أن أصبح وسيلة قائمة بذاتها لسبر أغوار بنية الذرة. ومثل بور الذي مزج النظريات الكلاسيكية والكمية ليصنع

التقدم، علينا أن نخطو للخلف خطوة مبتعدين عن أفكار أينشتاين حول كوانتات الضوء لنعرف كيف يعمل علم الأطياف، ولا يجدر بنا أن نفكر في الضوء إلا على أنه موجات كهرومغناطيسية* في مثل هذه الأبحاث.

يتكون الضوء الأبيض، كما أرسى ذلك نيوتن، من كل ألوان قوس قزح، وهي الطيف، ويقابل كل لون طول موجة مختلف، وباستخدام منشور زجاجي لفرد (لنشر) الضوء الأبيض إلى مكوناته الملونة نكون في الواقع قد فردنا (نشرنا) الطيف بحيث تصطف الموجات ذات الترددات المختلفة بعضها بجوار بعض على ستارة أو لوح فوتوغرافي. تقع أطوال الموجات القصيرة للونين الأزرق والبنفسجي في أحد طرفي الطيف وتقع أطوال الموجات الطويلة للون الأحمر في الطرف الآخر، مع أن الطيف يمتد أبعد من ذلك فيما وراء مدى الضوء المرئي لعيوننا، وإذا فردنا ضوء الشمس بهذه الطريقة سيُظهر الطيف وجود خطوط داكنة وحادة في مواقع محددة بدقة من هذا الطيف تقابل ترددات محددة بدقة، وبدون معرفة الكيفية التي تتكون بها هذه الخطوط، أرسى الباحثون — من أمثال جوزيف فراونهوفر (Joseph Fraunhofer)، وروبرت بنزن (Robert Bunsen) (الذي خلد اسمه بإطلاقه على اللهب المعملي المعروف)، وجوستاف كيرتشوف (Gustav Kirchhoff) في القرن التاسع عشر — بالتجارب أن كل عنصر ينتج فئة خاصة به من خطوط الطيف؛ فعند تسخين عنصر (مثل الصوديوم) في لهب من مصباح بنزن، ينتج عن ذلك لهب ذو لون مميز (لون أصفر في هذه الحالة)، وهو ينتج عن انبعاث قوي للإشعاع على شكل خط أو عدة خطوط شديدة التوهج في منطقة معينة من الطيف، وعند عبور الضوء الأبيض خلال سائل أو غاز يحتوي على العنصر نفسه، حتى لو كان العنصر متحدًا مع عناصر أخرى مكونًا مركبًا كيميائيًّا فإن طيف الضوء يظهر خطوط امتصاص داكنة، مثل تلك الخطوط الموجودة في ضوء الشمس، وعند الترددات المميزة لهذا العنصر نفسها.

* تخبرنا النظرية الكمية الشاملة أن الضوء جسيمات وموجات، إلا أننا لم نصل لذلك بعد.

ويفسر ذلك وجود الخطوط الداكنة في طيف الشمس ولا بد أن تكون هذه الخطوط قد نتجت عن سحب أبرد من المواد الموجودة في الغلاف الجوي للشمس، التي تمتص الإشعاع عند الترددات المميزة من الضوء العابر خلالها من سطح الشمس الأكثر سخونة بكثير. وقد قدمت هذه التقنية للكيميائيين وسيلة مفيدة لتحديد العناصر في أي مركب؛ إذا ألقيت بملح الطعام على النار مثلًا، فإن اللهب سيتوهج بلون أصفر مميز للصوديوم (وهو اللون المألوف اليوم لمصابيح الصوديوم الصفراء في الشوارع). أما في المعمل فإن الطيف المميز يمكن مشاهدته إذا غمست سلكًا في المادة تحت الاختبار ثم عرضته للهب مصباح بنزن، ويعطى كل عنصر النسق الخاص به لخطوط الطيف، وفي كل الأحوال يظل هذا النسق نفسه على الرغم من تغير شدته، وحتى لو تغيرت درجة حرارة اللهب. وتبين حدة خطوط اللطيف أن كل ذرة من ذرات العنصر تبعث أو تمتص بالضبط عند التردد نفسه، دون حيود أي ذرة منها عن ذلك. وبالمقارنة مع اختبارات اللهب تمكن المتخصصون في علم الأطياف من تحديد معظم الخطوط في طيف ضوء الشمس، وأمكنهم تفسيرها بأنها تعود إلى وجود العناصر المعروفة على الأرض. وفي خطوات عكسية لهذه الطريقة اكتشف الفلكي الإنجليزي نورمان لوكير (Norman Lockyer) (الذي أسس المجلة العلمية نيتشر Nature) خطوطًا في طيف الشمس لم يتمكن من تفسيرها بواسطة أي طيف لأي عنصر معروف، وقد قرر أنها لا بد أن ترجع لعنصر غير معروف من قبل وأطلق عليه اسم هليوم (Helium) وفيما بعد وفي حينه اكتشف الهليوم على الأرض، وثبت أنه يملك الطيف نفسه الذي يقابل الخطوط في طيف الشمس.

ويتمكن الفلكيون من اختبار النجوم البعيدة والمجرات بواسطة دراسات الطيف ليكتشفوا المادة الداخلة في تكوينها، ويتمكن علماء الذرة الفيزيائيون اليوم من اختبار البنية الداخلية للذرة باستخدام الأدوات نفسها.

وطيف الهيدروجين بالتحديد بسيط وذلك لأننا نعرف الآن أن الهيدروجين هو أبسط العناصر ولا تحتوي ذرته إلا على بروتون موجب

الشحنة هو النواة وإلكترون واحد سالب الشحنة مرتبط معها. وتسمى خطوط الطيف التي تمثل البصمة المتفردة للهيدروجين باسم خطوط بالمر (على اسم جوهان بالمر Johann Balmer المعلم السويسري الذي وضع معادلة تصف هذا النسق سنة ١٨٨٥، وهو العام الذي تصادف أن يشهد ميلاد نيلز بور). وتربط معادلة بالمر ترددات الطيف التي تحدث عندها خطوط الهيدروجين بعضها ببعض. وبدءًا من تردد أول خطوط الهيدروجين، في الجزء الأحمر من الطيف، تعطي معادلة بالمر تردد خط الهيدروجين التالي في الجزء الأخضر من الطيف، وبدءًا من الخط الأخضر، تطبق المعادلة نفسها على هذا التردد لتعطي تردد الخط التالي في الجزء البنفسجي، وهكذا.* ولم يكن بالمر عندما صاغ معادلته يعرف سوى الخطوط الأربعة للهيدروجين الموجودة في الطيف المرئي، لكن خطوطًا أخرى اكْتُشِفت وتوافقت تمامًا مع المعادلة، وعندما حُدِّدَت خطوط أكثر في طيف الهيدروجين في المنطقة تحت الحمراء وفوق البنفسجية، فإنها توافقت هي الأخرى مع هذه العلاقة العددية البسيطة، ومن الواضح أن معادلة بالمر كانت تعني شيئًا ما ذا قيمة عن بنية ذرة الهيدروجين، لكن ما هو؟

كانت معادلة بالمر جزءًا من المعلومات العامة بين الفيزيائيين، وجزءًا من الفيزياء في مرحلة الدراسة الجامعية عندما ظهر بور على مسرح الأحداث، لكن ذلك كان جزءًا من كتلة معقدة من البيانات عن الأطياف، التي لم يكن بور من المتخصصين فيها، وعندما بدأ بور العمل لحل لغز بنية ذرة الهيدروجين، لم يفكر ساعتها في سلسلة خطوط بالمر كمفتاح واضح يمكن استخدامه لفك الغموض، لكن عندما أشار أحد زملائه المتخصصين في الأطياف إلى البساطة التي عليها معادلة بالمر في الواقع (دون النظر إلى التعقيدات في أطياف الذرات الأخرى)، حينها التقط بور بسرعة قيمة

* تنص النسخة البسيطة من المعادلة على أن أطوال موجات أول أربعة خطوط في طيف الهيدروجين هي حاصل ضرب (٣٦,٤٥٦ × ١٠^{-٥}) في ٥/٩، ١٢/١٦، ٢١/٢٥، ٣٢/٣٦. وفي هذه النسخة من المعادلة يكون البسط في الكسور هو المربعات الآتية على التوالي: ٣^٢، ٤^٢، ٥^٢، ٦^٢، ويكون المقام هو الفرق بين المربعات (٣^٢ − ٢^٢)، (٤^٢ − ٢^٢) وهكذا.

هذه المعادلة، وفي هذا الوقت المبكر من عام ١٩١٣ كان بور قد اقتنع بالفعل أن جزءًا من حل اللغز يكمن في إدخال ثابت بلانك h، في المعادلات التي تصف الذرة. ولم يكن لدى ذرة رذرفورد إلا نوعان فقط من الأعداد الأساسية مضمنة في بنيتها، شحنة الإلكترون e، وكتلة الجسيمات الداخلة في بنية الذرة، ومهما حاولت اللعب بهذه الأرقام، لا يمكنك الحصول على عدد له وحدة أطوال من هذا الخليط من الكتلة والشحنة، ولذلك فإن نموذج رذرفور لا يملك وحدة للحجم «طبيعية». لكن بإضافة فعل مثل h إلى الموضوع يصبح من الممكن الوصول إلى عدد له أبعاد الطول، ويمكن اعتباره بصورة تقريبية شيئًا يوضح الأمور حول حجم الذرة. وعدديًّا، فإن التعبير h^2/me^2 يكافئ الطول: ٢٠ × ١٠^{−٨} سم، وهو العدد المطلوب تقريبًا ليتواءم مع خصائص الذرات، التي تم التوصل إليها من تجارب التشتت والدراسات الأخرى. كان واضحًا لبور أن h تنتمي إلى نظرية الذرات، وقد بينت له سلسلة بالمر أين ينتمي هذا الثابت.

كيف يمكن لذرة ما أن تنتج خطًّا حادًّا جدّا من خطوط الطيف؟ هذا يكون إما ببث أو امتصاص طاقة لها تردد ν، دقيق جدًّا، وعلاقة الطاقة بالتردد قائمة عن طريق ثابت بلانك ($E = h\nu$)، فإذا بعث إلكترون في ذرة ما بكمٍّ من $h\nu$ فإن طاقة هذا الإلكترون لا بد أن تتغير بكمية مساوية بالضبط لهذا الكم من الطاقة E. قال بور إن الإلكترونات تظل مستقرة في مكانها «في مدار» حول النواة لأنها لا تستطيع أن تشع طاقة مستمرة لكنها قادرة فقط على إشعاع (أو امتصاص) كوانتات كاملة من الطاقة — فوتون واحد — لتقفز من مستوى للطاقة (مدار حسب الصورة القديمة) إلى مستوى آخر، وتبين هذه الفكرة التي تبدو بسيطة، بالفعل تناقضًا آخر مع الأفكار الكلاسيكية؛ إنها كما لو كان كوكب المريخ قد اختفى من مداره وظهر في مدار الأرض لحظيًّا، وهو في هذه اللحظة يبعث في الفضاء بدفعة من الطاقة (إشعاع الجاذبية في هذه الحالة). ويمكنك أن ترى في الحال عجز فكرة المجموعة الشمسية في حالة الذرة عندما تبدأ في تفسير ما يحدث، وكيف أن الأمر سيكون أفضل كثيرًا لو اعتبرت أن

الإلكترونات موجودة ببساطة في حالات مختلفة تقابل مستويات مختلفة للطاقة داخل الذرة.

ويمكن أن يحدث القفز من حالة إلى أخرى في الاتجاهين، إلى أعلى سلم الطاقة أو إلى أسفله، فإذا امتصت ذرة ما الضوء، فإن الكوانتم $h\nu$ سيستخدم لتحريك الإلكترون إلى مستوى أعلى من الطاقة (إلى درجة أعلى على السلم)، فإذا عاد الإلكترون وسقط إلى حالته الأصلية بالضبط فإنه سيشع الطاقة نفسها $h\nu$. ويمكن كتابة الثابت الغامض ٣٦,٤٥٦ × ١٠^-٥ في معادلة بالمر بمدلول ثابت بلانك، ويعني ذلك أن بور كان قادرًا على حساب مستويات الطاقة الممكنة «المسموح بها» بالنسبة للإلكترون المفرد في ذرة الهيدروجين، ومن الممكن تفسير الترددات المقاسة لخطوط الطيف على أنها تمثل فرق الطاقة بين المستويات المختلفة.*

تفسير الهيدروجين

بعد أن ناقش بور أبحاثه مع رذرفورد قام بنشر نظريته عن الذرة في سلسلة من المقالات العلمية سنة ١٩١٣، اتفقت النظرية بصورة رائعة مع الهيدروجين، وبدت كأنها قادرة على التطور لتناسب أطياف الذرات الأكثر تعقيدًا بشكل جيد، وفي سبتمبر/أيلول حضر بور الاجتماع السنوي الثالث والثمانين للتجمع البريطاني لتقدم العلوم، وشرح أبحاثه للقاعة التي ضمت الكثيرين من علماء الذرة الفيزيائيين المرموقين في تلك الأيام. وقد قوبلت محاضرته على العموم بطريقة جيدة، ووصفها السير جيميس جينز

* عندما نتعامل مع الإلكترون والذرات فإن وحدات الطاقة العادية تبدو بالأحرى كبيرة جدًا، والوحدة المناسبة هي الإلكترون فولت (eV)، وهي كمية الطاقة التي يكتسبها الإلكترون عند حركته عبر فرق جهد كهربى مقداره فولت واحد. وقد أدخلت هذه الوحدة سنة ١٩١٢. وبمدلول الطاقة العادية فإن قيمة الإلكترون فولت هي ١,٦٠٢ × ١٠^-٩ جول، والوات الواحد هو جول واحد في الثانية. ويستهلك المصباح الكهربي عادة طاقة مقدارها ١٠٠ وات، التي يمكن التعبير عنها إذا أردت على أنها ٦,٢٤ × ١٠^٢٠ إلكترون فولت في الثانية، وبالتأكيد سيكون الأمر ذا وقع مؤثر إذا قلت أن مصباحك يشع ٦,٢٥ مائة مليون تريليون إلكترون فولت في الثانية، غير أن الطاقة هي نفسها كما كانت مائة وات للمصباح. والطاقة المتضمنة أثناء انتقال الإلكترونات التي تنتج خطوط الطيف هي بضعة إلكترون فولت eV، ويلزم ١٢,٦ إلكترون فولت لطرد الإلكترون نهائيًا من ذرة الهيدروجين. أما طاقة الجسيمات التي تنتج عن عمليات النشاط الإشعاعي فهي عدة ملايين إلكترون فولت eV.

(James Jeans) بأنها مقنعة وجديدة ومبدعة، لكن ج. ج. طومسون ظل ضمن الذين لم يقتنعوا، وقد سمع الجميع ببور وأبحاثه عن الذرة، حتى أولئك الذين لم يقتنعوا بها، في هذا الاجتماع.

وبعد ثلاثة عشر عامًا من محاولة بلانك اليائسة في إقحام الكوانتم في نظرية الضوء، أدخل بور الكوانتم في نظرية الذرة غير أن الأمر قد استغرق ثلاثة عشر عامًا أخرى لتبزغ نظرية الكوانتم الحقيقية، كان التقدم في ذلك الوقت يحدث ببطء مزعج — خطوة للخلف لكل خطوتين للأمام، وفي بعض الأحيان خطوتين للخلف لكل خطوة بدت أنها في الاتجاه الصحيح — وكانت ذرة بور خليطًا؛ مزجت هذه الذرة الأفكار الكمية مع أفكار الفيزياء الكلاسيكية، وقد بدا أن استخدام الخليط، مهما كان، أمرًا ضروريًّا لترقيع أو لصق الأمور مع بعضها ومنح النموذج فرصة البقاء والاستمرار، وقد سمح ذلك بعدد أكبر كثيرًا من خطوط الطيف — أكبر من تلك التي يمكن مشاهدتها في الضوء من الذرات المختلفة — ولا بد من تطبيق قواعد صارمة حتى يمكن القول إن بعض الانتقالات بين مستويات الطاقة المختلفة داخل الذرة «غير مسموح بها» وحُدِّدَت خصائص جديدة للذرة — الأرقام الكمية — وذلك لتتفق مع المشاهدات خاصة، دون أن يكون لها أي أساس نظري يؤمنها ويفسر السبب في ضرورة اللجوء لهذه الأرقام الكمية، أو السبب في عدم السماح بحدوث بعض الانتقالات. في وسط كل ذلك تمزق العالم الأوربي بنشوب الحرب العالمية الأولى، في السنة التي تلت إعلان بور لنموذجه الأول للذرة.

ومثل أي جانب آخر من جوانب الحياة، لم يكن مقدرًا للعلم أن يظل كما هو بعد سنة ١٩١٤؛ فقد أوقفت الحرب سهولة انتقال الباحثين من بلد لآخر، ومنذ الحرب العالمية الأولى وبعد ذلك وجد بعض العلماء من بعض البلاد صعوبة في الاتصال بكل زملائهم حول العالم، وأثرت الحرب مباشرة في البحث العلمي في المراكز الكبرى حيث أحرز الفيزيائيون الكثير من التقدم في السنوات الأولى من القرن العشرين. فقد ترك العلماء الشبان في الدول المشاركة في الحرب معاملهم وذهبوا إلى الحرب تاركين وراءهم

الأساتذة المسنين، مثل رذرفورد ليواصلوا العمل على قدر استطاعتهم، وقد توفي الكثيرون من هؤلاء الشبان في الحرب، وهم الجيل الذي كان منوطًا به التقاط أفكار بور وتطويرها في السنوات التي تلت سنة ١٩١٣. وقد تأثرت كذلك أبحاث العلماء المحايدين، مع أن بعضهم ربما يكون قد استفاد من سوء حظ الآخرين. فقد عُيِّن بور نفسُه «قائدًا» Reader في الفيزياء بجامعة مانسشتر، أما في جوتنجن فقد أجرى مواطن هولندي اسمه بيتر ديباي Peter Debye، دراسات هامة عن بنية البلورات، مستخدمًا أشعة X كمسبار. وقد ظلت هولندا والدانمرك في الواقع واحتين علميتين في ذلك الوقت. وقد عاد بور إلى الدانمرك سنة ١٩١٦ ليشغل منصب أستاذ الفيزياء النظرية في كوبنهاجن، ثم ليؤسس معهد الأبحاث الذي يحمل اسمه سنة ١٩٢٠. كانت الأخبار التي تأتي من باحث ألمانى مثل أرنولد سومرفيلد Arnold Sommerfeld (أحد الفيزيائيين الذين تعلموا نموذج بور الذري للدرجة التي كان يشار فيها للنموذج أحيانًا باسم ذرة «بور-سومرفيلد») تعبر إلى الدانمرك المحايدة، ثم بعد ذلك من بور إلى رذرفورد في إنجلترا. استمر التقدم لكنه لم يكن التقدم نفسه الذي كان في السابق.

بعد الحرب لم يكن العلماء الألمان والنمساويون يدعون إلى المؤتمرات الدولية لسنين طويلة، وكانت روسيا تموج بالثورة، وفقد العلم بعضًا من أمميته كما فقد جيلًا من الشباب، وصل العلم إلى جيل جديد تمامًا ليأخذ نظرية الكم من المقر الوسط الذي استقرت فيه خلطة ذرة بور (الذي هذبته وصقلته الجهود المضنية للعديد من الباحثين بحيث أصبح فعالًا بشكل لافت بعد أن كان اختراعًا أو وسيلة آيلة للانهيار) إلى النصر الكامل لميكانيكا الكم، ودوت أسماء هذا الجيل في عالم الفيزياء الحديثة: ويرنر هايزبنرج Werner Heisenberg، وبول ديراك Paul Dirac، وولفجانج باولي Wolfgang Pauli وباسكوال جوردان Pascual Jordan، وآخرون. كانوا أعضاء في الجيل الكمي الأول، الجيل الذي ولد ونشأ في السنوات التي تلت مساهمة بلانك العظمى (باولي في ١٩٠٠، وهايزنبرج في ١٩٠١، وديراك وجوردان في ١٩٠٢)، ودخل إلى عالم البحث العلمي في عشرينيات القرن

العشرين، لم تكن لهم جذور متأصلة من التدريب في الفيزياء الكلاسيكية ليتغلبوا عليها، وكانوا أقل حاجة للاحتفاظ بمذاق ونكهة الأفكار الكلاسيكية في نظرياتهم عن الذرة من عالم متألق مثل بور وأفكاره التي في منتصف الطريق. لقد كان مناسبًا تمامًا، وربما ليس صدفة أن الزمن منذ اكتشاف بلانك لمعادلة الجسم الأسود وحتى ازدهار ميكانيكا الكم هو ستة وعشرين عامًا بالضبط، وهو الزمن الذي يلزم ليتطور جيل من الفيزيائيين الجدد ويصبحوا علماء باحثين. غير أن هذا الجيل كان يملك ميراثين عظيمين من الجيل الأكبر الذي مازال نشطًا، وبعيدًا عن ثابت بلانك نفسه؛ الميراث الأول كان ذرة بور الذي زودهم بمؤشر واضح على أن الأفكار الكمية لا بد أن تتضمن في أي نظرية مقنعة عن العمليات الذرية، أما الميراث الثاني فقد جاء من عالم عظيم في عصره، الذي بدا أنه لم تسلبه أفكار الفيزياء الكلاسيكية نشاطه وفعاليته مما يعد استثناءً من كل القواعد. فسنة ١٩١٦ وفي أوج الحرب كان أينشتاين يعمل في ألمانيا، وقد أدخل مفهوم الاحتمال في نظرية الذرة، وقد قام بذلك كوسيلة، (مساهمة أخرى في الخليط الذي جعل طريقة عمل ذرة بور مماثلة لسلوك ذرة حقيقية)، إلا أن هذه الوسيلة عاشت أطول من ذرة بور لتصبح الأساس لنظرية الكم الحقيقية، ومع ذلك — ومن دواعي السخرية — فقد تبرأ أينشتاين فيما بعد منها في مقولته الشهيرة: «إن الرب لا يلعب النرد».

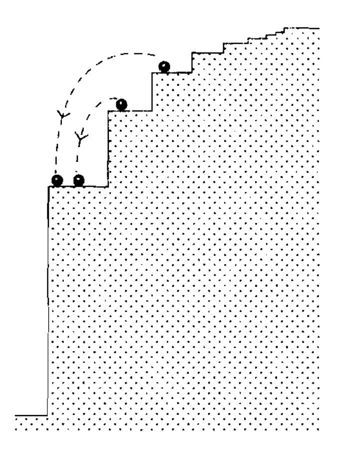
عنصر الصدفة: نرد الرب

بالعودة إلى العقد الأول من القرن العشرين، وعندما كان رذرفورد وزميله فردريك سودي يفحصان طبيعة النشاط الإشعاعي، اكتشفا خاصية مثيرة وأساسية من خصائص الذرة، أو بالأحرى من خصائص نواة الذرة، ولا بد أن يتضمن التحلل الإشعاعي، كما أصبح يسمى، تغيرًا أساسيًّا في الذرة المفردة (ونعرف الآن أن ذلك يتضمن انشطار النواة ولفظ جزء منها)، ويبدو أنه لا يتأثر بأي مؤثر خارجي، لو سخنت الذرات أو بردتها، ولو

وضعتها في فراغ أو في دلو من الماء، فإن التحلل الإشعاعي سيستمر دون أي اضطراب. ويبدو أنه لا توجد طريقة للتنبؤ بأن ذرة محددة من المادة النشطة إشعاعيًّا ستتحلل، وتبعث بجسيمات ألفا أو بيتا أو بأشعة جاما، إلا أن التجارب قد بينت أن نسبة معينة من عدد كبير من الذرات النشطة إشعاعيًّا للعنصر نفسه ستتحلل دائمًا في زمن معين، وتحديدًا هناك زمن مميز لكل عنصر مشع يسمى زمن نصف العمر، تتحلل خلاله نصف الذرات بالضبط في أي عينة. وزمن نصف العمر للراديوم مثلًا هو ١٦٠٠ سنة، أما إحدى صور الكربون المشعة، وهي الكربون-١٤ فلها زمن نصف عمر أقل قليلًا من ٦٠٠٠ سنة، الأمر الذي جعلها مفيدة للتأريخ في دراسة الآثار، وهناك البوتاسيوم المشع الذي يتحلل بزمن نصف عمر ١٣٠٠ مليون سنة.

وبدون معرفة السبب الذي يجعل ذرة ما ضمن عدد هائل من الذرات تتحلل ولا تتحلل جاراتها، استخدم رذرفورد وسودي هذا الاكتشاف كأساس لنظرية إحصائية للتحلل الإشعاعي، وهي النظرية التي تستخدم تقنيات التأمين الإكتوارية Actuarial التي تطبقها شركات التأمين، التي تعرف أن بعض الناس المؤمن عليهم سيموتون في سن مبكرة وأن ورثتهم سيتسلمون من شركة التأمين أكثر كثيرًا مما دفعوا، أما العملاء الآخرون فسيعيشون طويلًا وسيدفعون مبالغ كافية لتعويض ذلك. وبدون معرفة متى سوف يموت أي من العملاء ستمكن الجداول التأمينية موظفي الحسابات من إجراء الموازنة. وبالطريقة نفسها، تسمح الجداول الإحصائية للفيزيائيين بضبط موازنة التحلل الإشعاعي، بشرط أن يجري التعامل مع تجمعات كبيرة من الذرات.

وإحدى السمات المثيرة لهذا السلوك هي أن النشاط الإشعاعي لن يختفي أبدًا من عينة من مادة مشعة، فيتحلل نصف عدد ملايين الذرات في فترة زمنية معينة، وبعد زمن نصف عمر آخر — بالضبط نفس الفترة الزمنية — سيتحلل النصف الباقي، وهكذا، وكلما اقتربنا من الصفر تناقص عدد الذرات المشعة المتبقية دون تحلل باستمرار، لكن كل خطوة نحو الصفر ستسير حتى النصف فقط.



شكل ٤-١: يمكن مقارنة مستويات الطاقة في ذرة بسيطة مثل الهيدروجين بمجموعة من الدرج لها أعماق مختلفة، وتمثل الكرة الموضوعة على الدرجات المختلفة إلكترونًا في مستويات الطاقة المختلفة للذرة، وتقابل الحركة من درجة ما إلى درجة أخرى انطلاق كمية محددة بدقة من الطاقة، وهي المسئولة في ذرة الهيدروجين عن خطوط سلسلة بالمر من الطيف، ولا توجد خطوط بينية لأنه لا توجد درجات بين الدرجات الموجودة «ليستقر» عليها الإلكترون.

وفي تلك الأيام الأولى، كان الفيزيائيون من أمثال رذرفورد وسودي يتصورون أنه في النهاية سيأتي شخص ما ويكتشف بالضبط ما الذي يجعل ذرة معينة تتحلل، وأن هذا الاكتشاف سيفسر الطبيعة الإحصائية للعملية. وعندما أخذ أينشتاين التقنيات الإحصائية وطبقها على نموذج بور وتفاصيل الطيف الذري، فإنه قد استبق الأمر مؤكدًا أن الاكتشافات التالية ستلغي الحاجة إلى «الجداول التأمينية» الإكتوارية. وكانوا جميعًا على خطأ.

من الممكن اعتبار مستويات الطاقة للذرة أو للإلكترون في ذرة ما، على أنها مثل قفزات درجات السلم، وليست كل خطوة من خطوات الدرجات متساوية بمدلول الطاقة؛ فالدرجات التي على القمة خطواتها متقاربة من

بعضها أكثر من خطوات الدرجــات التي في القــاع، وقد بين بور أنه في حــالة الهيدروجين، أبسط الــذرات، يمكن تمثيل مستويات الطاقة كدرجات سلم بحيث يتناسب عمق كل درجة من درجات السلم أسفل القمة مع $1/n^2$، حيث n رقم كل درجة بدءًا من القاع، ويتطلب انتقال إلكترون من المستوى الأول إلى المستوى الثاني كمية من الطاقة hv بالضبط ليتحرك أعلى هذه الخطوة، فإذا عاد الإلكترون ثانية إلى المستوى الأول (الحالة الأرضية للذرة) سيطلق الكمية نفسها من الطاقة. ولا توجد وسيلة تجعل الإلكترون في الحالة الأرضية يمتص طاقة أقل، لأنه لا توجد وسيلة تجعل الإلكترون في المستوى الثاني يبعث بطاقة أقل من كم الطاقة، لأنه لا توجد خطوات كثيرة يستطيع الإلكترون أن يأوي إليها، ولأنه من الممكن أن يقفز الإلكترون أو يهبط من أي درجة إلى درجة أخرى، يوجد عدد كبير من الخطوط في طيف كل عنصر، ويقابل كل خط منها انتقال بين درجتين — بين مستويين للطاقة لهما أرقام كمية مختلفة — وتؤدي كل الانتقالات التي تنتهي بالحالة الأرضية، مثلًا، إلى عائلة من خطوط الطيف مثل سلسلة بالمر، وتؤدي كل الانتقالات التي تنتهي في المستوى الثاني إلى فئة أخرى من الخطوط، وهكذا.* تتصادم ذرات الغاز الساخن باستمرار بعضها مع بعض، بحيث تثار الإلكترونات إلى مستويات أعلى ثم تعود ثانية وتشع خطوط طيف مضيئة أثناء ذلك، وعندما يعبر الضوء خلال غاز بارد فإن الإلكترونات في الحالة الأرضية ترتفع إلى مستويات طاقة أعلى في الوقت الذي تمتص فيه الضوء تاركة خطوطًا داكنة في الطيف.

وإذا كان النموذج الذري لبور يعني أي شيء، فإن ذلك يفسر الكيفية التي يرتبط بها إشعاع الطاقة من الذرات الساخنة بقانون بلانك. ولا بد أن يكون طيف التجويف للجسم الأسود ببساطة هو التأثير المشترك لأعداد كبيرة من الذرات التي تشع طاقة كلما قفزت الإلكترونات من مستوى إلى مستوى آخر للطاقة.

* في الحقيقة، تقابل سلسلة بالمر في طيف الهيدروجين الانتقالات التي تنتهي في المستوى الثاني.

أكمل أينشتاين نظريته للنسبية العامة سنة ١٩١٦ ووجه اهتمامه مرة أخرى بعد ذلك إلى نظرية الكم (قد يبدو ذلك عملية بعث أو خلق من جديد، مقارنة بأبحاثه الكبرى). ولعل ما حمسه لذلك النجاح الذي حققه نموذج بور للذرة، وكذلك نسخته الخاصة في ذلك الوقت من نظرية الجسيمات للضوء التي بدأت تكسب أرضًا. كان الفيزيائي الأمريكي أندروز ميليكان Andrews Millikan واحدًا من أشد المعارضين لتفسير أينشتاين للظاهرة الفوتوكهربية عندما ظهر هذا التفسير أول مرة سنة ١٩٠٥، وقد أنفق عشر سنوات يختبر الفكرة في سلسلة من التجارب الممتازة، بادئًا بفرض إثبات خطأ أينشتاين لكنه انتهى سنة ١٩١٤ بإثبات تجريبي مباشر لتفسير أينشتاين للظاهرة الفوتوكهربية بمدلول كوانتا الضوء، أو الفوتون، وأثناء هذه العملية طور طريقة تجريبية لتعيين قيمة h في غاية الدقة، وسنة ١٩٢٣، وحتى تكتمل السخرية حصل على جائزة نوبل عن أبحاثه وقياسه لشحنة الإلكترون.

وقد أدرك أينشتاين أن تحول الذرة من حالة طاقة «مثارة» — بها الإلكترون في مستوى طاقة عال — إلى حالة ذات طاقة أقل — بها الإلكترون في مستوى طاقة منخفض — يشبه التحلل الإشعاعي للذرة إلى حد بعيد، وقد استخدم التقنية الإحصائية التي طورها بولتزمان (للتعامل مع سلوك تجمعات الذرات) للتعامل مع حالات الطاقة المفردة، وتوصل إلى حساب احتمال وجود ذرة معينة في حالة من الطاقة تقابل رقمًا كميًّا معينًا n، واستخدم جداول التأمين الإكتوارية الاحتمالية للإشعاع ليتوصل إلى حساب ترجيح «تفكك أو تحلل» ذرة ما في الحالة n إلى حالة أخرى ذات طاقة أقل (ذات رقم كمي أقل). وقد أدى ذلك ببساطة ووضوح إلى استنتاج معادلة بلانك لإشعاع الجسم الأسود على أساس كلي من الأفكار الكمية، وفي الحال، تمكن بور من استخدام أفكار أينشتاين الإحصائية لنشر نموذجه الذري مفسرًا وجود بعض الانتقالات الأساسية وحالات الطاقة الأكثر احتمالًا — أكثر أرجحية في الحدوث — من بعضها الآخر، ولم يستطع تفسير السبب وراء ذلك، غير أنه لم يهتم أحد كثيرًا بذلك في هذا الوقت.

كان أينشتاين مثله مثل الذين كانوا يدرسون النشاط الإشعاعي يعتقد أن الجداول التأمينية الإكتوارية ليست نهاية المطاف، وأن الأبحاث القادمة ستحدد السبب وراء حدوث انتقالات معينة في اللحظة التي تحدث فيها بالضبط، وليس في أي وقت آخر. غير أنه عند هذه النقطة بدأت النظرية الكمية في الحقيقة الانفصام عن الأفكار الكلاسيكية، ولم يكتشف أي «سبب» وراء حدوث التحلل الإشعاعي أو انتقالات الطاقة الذرية عندما تحدث أبدًا. ويبدو في الواقع أن هذه التغيرات تحدث كليًّا بالصدفة، على أساس إحصائي، وقد بدأ ذلك في إثارة تساؤلات فلسفية أساسية.

ففي العالم الكلاسيكي لكل شيء سبب، ويمكنك تتبع سبب أي حدث في زمن وقوعه ثم لتجد سبب وقوع السبب، والسبب في هذا السبب وهكذا حتى تصل إلى الانفجار العظيم (Big Bang) (إذا كنت من علماء الكون)، أو حتى لحظة الخلق في السياق الديني، إذا كان ذلك ما تؤمن به. لكن في عالم الكم تبدأ مثل هذه السببية في الاختفاء بمجرد أن نفحص التحلل الإشعاعي والانتقالات الذرية. فالإلكترون لا ينتقل من مستوى معين للطاقة إلى مستوى آخر في زمن معين لأي سبب محدد. وتفضل الذرة أكثر مستويات الطاقة انخفاضًا، بالمعنى الإحصائي، ولذا فمن الأرجح (كمية الأرجحية من الممكن كنتمتها Quantified) أن يقوم الإلكترون بهذه الحركة إن آجلًا أو عاجلًا (العودة إلى المستوى الأكثر انخفاضًا). ولا توجد وسيلة تخبرنا متى سيحدث هذا الانتقال، فلا يوجد عامل خارجي يدفع الإلكترون، ولا توقيت داخلي يفرض على الإلكترون القفز في توقيت محدد، إنما يحدث ذلك فحسب، ليس لسبب محدد يحدث الآن وليس عندئذ.

وليس ذلك الأمر انفصامًا ما مع السببية المحددة، مع أن هذه الفكرة كانت ستروع الكثيرين من علماء القرن التاسع عشر، وهي الفكرة التي أشك أنها تهم أيًّا من قراء هذا الكتاب. لكن ذلك ليس سوى قمة جبل الجليد، وأول أحجية في غرابة عالم الكوانتم، ومع ذلك فمن الأشياء التي تستحق الإشارة هنا أنها لم تكن موضوع ترحيب في ذلك الوقت، جاء ذلك سنة ١٩١٦ وجاء من أينشتاين.

الذرات في المنظور

لعل التوسع في تفاصيل كل التعديلات والتهذيبات التي وقعت لنموذج بور الذري حتى سنة ١٩٢٦ يكون أمرًا مضجرًا، والأكثر ضجرًا من ذلك أنه قد اتضح أن معظم هذا السعي وتلمس الطريق نحو الحقيقة كان خطأ على أي الأحوال، غير أن ذرة بور كانت لها قبضة قوية في الكتب الدراسية وكتب تبسيط العلوم لدرجة أنه لا يمكن إهمالها، وهى في شكلها النهائي تمثل آخر نموذج للذرة يحمل أي ارتباط مع الصور التي اعتدنا عليها في حياتنا اليومية، وقد تبين أن الذرة التي على شكل كرة البلياردو التي لا تنقسم عند القدماء، ليس فقط تنقسم ولكنها تتكون في معظمها من فراغ، تملؤه جسيمات غريبة تأتي بأشياء غريبة. وقد قدم بور إطارًا وضع بعضًا من هذه الأشياء الغريبة في سياق يشبه حياتنا اليومية، ومع أنه من الأفضل استبعاد كل الأفكار عن حياتنا اليومية قبل الانغماس كلية في عالم الكوانتم، فإن معظم الناس يبدون أكثر سعادة عندما يستعرضون نموذج بور قبل هذا الانغماس. لنتوقف في منتصف المسافة بين الفيزياء الكلاسيكية ونظرية الكوانتم لنلتقط أنفاسنا ونسترح لوهلة قبل أن نتحرك داخلين إلى منطقة مجهولة. لكن دعونا لا نضيع الوقت والطاقة في تتبع كل الأخطاء وأنصاف الحقائق التي تضمنتها عملية الخلط في تطوير نموذج بور والنواة في السنوات التي امتدت حتى سنة ١٩٢٦، وبدلًا من ذلك، سأستخدم منظور ثمانينيات القرن العشرين لإلقاء نظرة على ذرة بور ولوصف نوع من التخليق الحديث لأفكار بور وأفكار رفاقه، بما في ذلك بعض قطع اللغز التي في حقيقة الأمر وضعت في مكانها مؤخرًا جدًا.

الذرات متناهية الصغر، وعدد أفوجادرو Avogadro هو عدد ذرات الهيدروجين في جرام واحد من الغاز. وليس غاز الهيدروجين من نوع الأشياء التي نقابلها في حياتنا اليومية، ومع ذلك، ولغرض التعرف على مدى صغر الذرات، فلنفكر بدلًا من ذلك في قطعة من الكربون؛ الفحم أو الماس أو السناج. ولأن كل ذرة كربون تزن ١٢ ضعف ذرة الهيدروجين، فإن

العدد نفسه من ذرات الكربون المماثل لجرام واحد من ذرات الهيدروجين يزن ١٢ جرامًا. وعشرة جرامات تزن أكثر قليلًا من ثلث أوقية Ounce، أما اثنا عشر جرامًا فهي تزن أقل قليلًا من نصف أوقية. وملعقة كبيرة من السكر، أو ماسة كبيرة أو قطعة صغيرة من الفحم، كلها تحتوي على عدد أفوجادرو من الذرات، ٦×١٠^{٢٣} (العدد ٦ متبوعًا بثلاثة وعشرين صفرًا). كيف نضع هذا العدد في منظورنا؟ ويطلق على الأعداد الكبيرة جدًّا عادة «أعداد فلكية» والكثير من الأعداد الفلكية بالفعل كبيرة، لذلك دعونا نحاول إيجاد عدد كبير يمكن مقارنته من الفلك.

يعتقد الفلكيون أن عمر العالم تقريبًا ١٥ بليون سنة ١٥×١٠^{٩} سنة، والعدد $١٠^{٢٣}$ أكبر كثيرًا من $١٠^{٩}$ ولنحول الآن عمر العالم إلى رقم أكبر من ذلك مستخدمين أصغر وحدات الزمن، التي نشعر تجاهها بألفة، وهي الثانية. تحتوي كل سنة على ٣٦٥ يومًا، وكل يوم على ٢٤ ساعة، وكل ساعة على ٣٦٠٠ ثانية، وإذا قربنا الأرقام فإن كل سنة تحتوي على ٣٢ مليون ثانية أي نحو ٣×١٠^{٧} ثانية. وبذا فإن ١٥ بليون سنة تحتوي على ٤٥×١٠^{١٦} ثانية، وذلك باتباع قاعدة جمع الأسس في حالة الضرب مثل $١٠^{٩}$ و$١٠^{٧}$ لتعطي $١٠^{١٦}$، ومرة أخرى بالتقريب فإن عمر الكون بالثواني هو ٥×١٠^{١٧}. وهذا العدد أقل كثيرًا جدًّا من ٦×١٠^{٢٣} بمقدار ٦ في الأس. ولا يبدو ذلك سيئًا جدًّا عندما يكون لدينا الأس ٢٣ للعدد عشرة لنتعامل معها، ولكن ماذا يعنى ذلك؟ فلنقسم ٦×١٠^{٢٣} على ٥×١٠^{١٧}، وبطرح الأسس فإننا نحصل على رقم يفوق قليلًا ١×١٠^{٦} — أي مليون. والآن تخيل كائنًا خارقًا يراقب تطور عالمنا منذ لحظة الانفجار العظيم للخلق، وقد زود الكائن الخارق بنصف أوقية من الكربون النقي وبملقاط فائق الصغر بحيث يمكنه التقاط ذرة واحدة مفردة من الكربون من الكومة، وإذا بدأ الكائن الخارق منذ لحظة بداية الانفجار العظيم التي ولد فيها عالمنًا، في إزالة ذرة كربون واحدة من الكومة كل ثانية ليلقيها بعيدًا، فإنه يكون الآن قد التقط وأزال ٥×١٠^{١٧} ذرة، فما هو الجزء المتبقي؟ بعد كل ذلك النشاط والعمل على مدى ١٥ بليون سنة، يكون الكائن الخارق

قد أزال جزءًا واحدًا فقط من مليون جزء من ذرات الكربون، وما تبقى في الكومة أكبر مليون مرة من الجزء الذي استبعد.

والآن لعلك قد أخذت فكرة عن مدى صغر الذرة والمفاجأة ليست كون نموذج بور للذرة ليس دقيقًا وتقريبيًّا، ولا كون قوانين الفيزياء اليومية (العادية) لا تنطبق على الذرات، المعجزة أننا قد نفهم أي شيء عن الذرات، وأننا نستطيع إيجاد طرق للعبور فوق الفجوة بين الفيزياء النيوتونية الكلاسيكية والفيزياء الكمية للذرة.

ومادام قد أمكن بناء صورة حسية لأي شيء دقيق، فإن ذلك هو ما تشبهه الذرة. وكما أوضح رذرفورد، فإنها نواة دقيقة محاطة بسحابة من الإلكترونات تطن حولها كما يطن النحل. وكان الاعتقاد السابق أولًا هو أن النواة تتكون من البروتونات فقط، وكل واحد منها عليه شحنة موجبة بنفس مقدار الشحنة السالبة للإلكترون، وبذلك فإن عددًا متساويًا من البروتونات والإلكترونات يجعل كل ذرة متعادلة كهربيًّا، وقد اتضح فيما بعد أن هناك جسيمة أساسية ذرية أخرى شبيهة بالبروتون لكنها لا تملك شحنة كهربية؛ إنه النيوترون، والنيوترونات موجودة في كل ذرة إلى جوار البروتونات في النواة ماعدا ذرة أبسط صور الهيدروجين. لكن عدد البروتونات في النواة في الحقيقة مساو تمامًا لعدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة، ويحدد عدد البروتونات في النواة نوع العنصر الذي تتبعه هذه الذرة، ويحدد عدد الإلكترونات في السحابة (العدد نفسه للبروتونات)؛ كيمياء هذه الذرة وذلك العنصر. لكن لأن بعض الذرات التي تملك العدد نفسه من البروتونات والإلكترونات مثل بعضها، قد تملك أعدادًا مختلفة من النيوترونات، فإن العناصر الكيميائية يمكن أن تجيء في صور مختلفة تسمى النظائر Isotopes، وقد أدخل سودي هذا الاسم سنة ١٩١٣ مستعيرًا إياه من اللغة الإغريقية «الموقع نفسه»، وذلك بسبب اكتشاف وجود ذرات ذات أوزان مختلفة تنتمي للموقع نفسه في جدول الخصائص الكيميائية، الجدول الدوري للعناصر. وقد حصل سودي على جائزة نوبل (في الكيمياء) سنة ١٩٢١ لأبحاثه في النظائر.

وأبسط نظير لأبسط عنصر هو الصورة الأكثر شيوعًا للهيدروجين، التي فيها بروتون واحد مصحوب بإلكترون واحد، أما في الديوتيريوم (Deuterium)، فكل ذرة تتكون من بروتون واحد ونيوترون واحد مصحوبين بإلكترون واحد، لكن كيمياء الديويتريوم هي نفسها كيمياء الهيدروجين العادي. ولكون كتلة البروتونات والنيوترونات متقاربة جدًا وتقريبًا هي نفسها، وكل منها أثقل ٢٠٠٠ مرة تقريبًا من الإلكترون، فإن العدد الكلي للبروتونات والنيوترونات في النواة يحدد الكتلة الكلية للذرة إلا قليلًا، ويرمز لهذا العدد A، ويطلق عليه رقم الكتلة. أما عدد البروتونات في النواة، الذي يحدد خصائص العنصر، فيسمى الرقم الذري Z ويطلق على وحدة قياس كتلة الذرة بالمنطق وحدة الكتلة الذرية، وتعرف بأنها جزء من اثني عشر جزءًا من كتلة نظير الكربون الذي يحتوي على ستة بروتونات وستة نيوترونات في نواته ويسمى هذا النظير الكربون-١٢ (Carbon-12) أو يكتب باختصار ^{12}C، أما النظائر الأخرى للكربون فهي ^{13}C، ^{14}C وهي تحتوي على سبعة وثمانية نيوترونات في كل نواة على الترتيب.

ويزداد تنوع النظائر مع زيادة كتلة النواة (زيادة عدد البروتونات). فالقصدير مثلًا، له خمسون بروتونًا في نواته ($Z = 50$) وعشرة نظائر مستقرة لها أرقام الكتلة المتدرجة من $A = 112$ (٦٢ نيوترون) إلى $A = 124$ (٧٤ نيروتورن). وتحتوي الأنوية المستقرة على الأقل على العدد نفسه من النيوترونات مثل البروتونات (ما عدا أبسط ذرة للهيدروجين)، وتساعد النيوترونات المتعادلة في تماسك البروتونات الموجبة معًا التي لها ميل للتنافر فيما بينها. ويرتبط النشاط الإشعاعي بالنظائر غير المستقرة التي تتحول إلى أخرى مستقرة وتبعث بالأشعة أثناء ذلك، وما أشعة بيتا سوى إلكترون انبعث لدى تحول نيوترون إلى بروتون، وجسيمات ألفا هي أنوية ذرية قائمة بذاتها، فهي تتكون من زوج من البروتونات وزوج من النيوترونات (نواة هليوم-٤) انبعثت من نواة غير مستقرة أثناء إعادة ترتيب بنيتها الداخلية. أما الأنوية الكثيفة غير المستقرة فإنها تنشطر إلى اثنتين أو

أكثر من الأنوية الأخف والمستقرة وذلك عن طريق العملية المعروفة جيدًا اليوم وهي الانشطار النووي أو الذري، التي يصاحبها انطلاق جسيمات ألفا وبيتا من هذا الوسط. ويحدث كل ذلك في حيز ضئيل جدًّا يصعب تخيله من الذرة نفسها. ويبلغ قطر الذرة العادية $١٠^{-١٠}$ من المترأما النواة فنصف قطرها لا يزيد على $١٠^{-١٥}$ من المتر، أي $١٠^{٥}$ مرة أصغر من الذرة. ولأن الحجم يتعامل مع مكعب نصف القطر، فإننا سنجد أن حجم النواة أصغر بمقدار $١٠^{١٥}$ مرة من حجم الذرة.

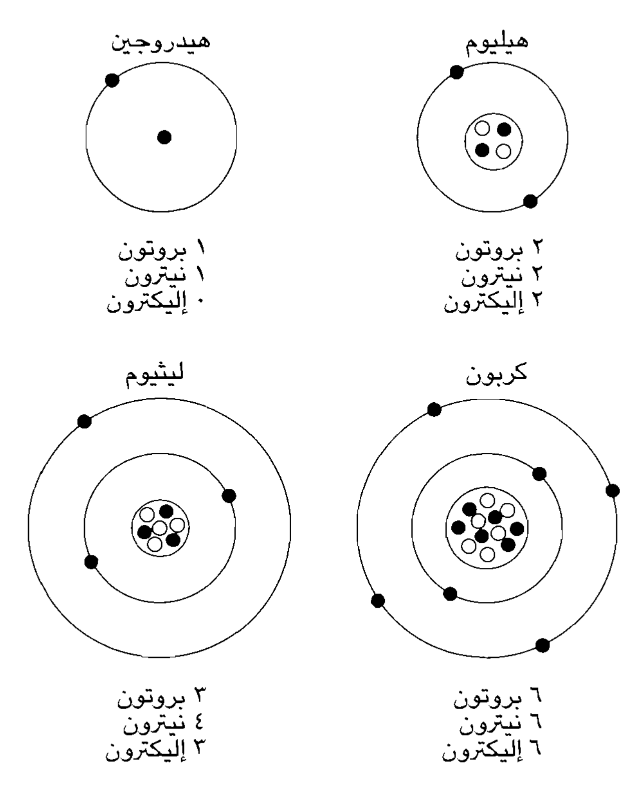
تفسير الكيمياء

تزود سحابة الإلكترونات الذرة بوجهها الخارجي وبالوسائل التي تتفاعل بها مع الذرات الأخرى، وما يرقد عميقًا في قلب السحابة الإلكترونية على الأغلب ليس ماديًّا أما «ما تراه» ذرة أخرى و«ما تشعر» به فهي الإلكترونات نفسها، والتفاعل بين سحب الإلكترونات هو المسئول عن الكيمياء، وبشرح السمات العريضة للسحابة الإلكترونية، وضع بور الكيمياء على أسس علمية راسخة بواسطة نموذج الذرة الخاص به. كان الكيميائيون يعرفون أن بعض العناصر كانت متشابهة جدًّا في خصائصها الكيميائية مع أن لها أوزانًا ذرية مختلفة، وعندما جرى ترتيب العناصر في جدول تبعًا لأوزانها الذرية (وعلى وجه الخصوص عندما سُمِحَ بالنظائر المختلفة)، اتضح أن العناصر المتماثلة كانت تتكرر على فترات منتظمة، وكان أحد الأنساق، مثلًا يتكرر كل فرق مساو لثمانية أرقام ذرية. وقد أعطى هذا الترتيب للعناصر ذات الصفات المتماثلة في مجموعات اسم الجدول الدوري.

زار بور جامعة جوتينجن في ألمانيا في شهر يونيو/حزيران سنة ١٩٢٢، ليلقي سلسلة من المحاضرات حول نظرية الكم وبنية الذرة، وكانت جوتينجن على وشك أن تصبح واحدة من ثلاثة مراكز رئيسية لتطوير النسخة الشاملة لنظرية الكم، تحت إشراف ماكس بورن Max Born، الذي أصبح أستاذًا للفيزياء النظرية هناك سنة ١٩٢١. وقد ولد بورن سنة ١٨٨٢ ابنًا لأستاذ تشريح بجامعة بريسيلاو Breslau، وكان طالبًا عندما ظهرت أفكار بلانك

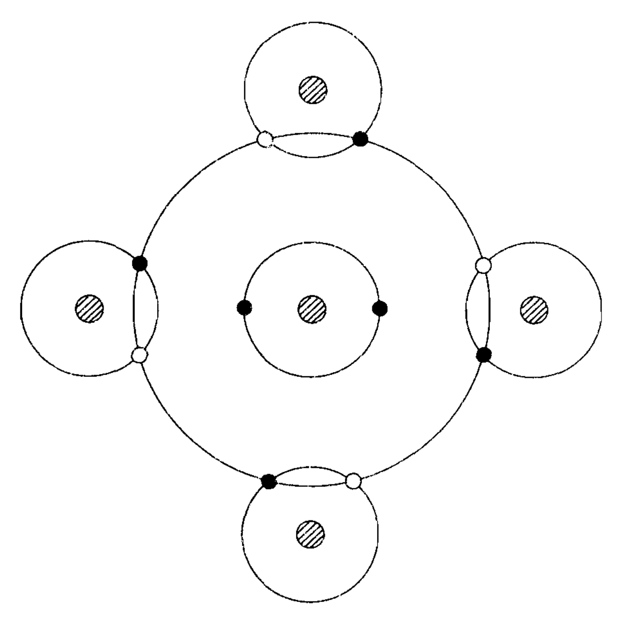
لأول مرة في السنوات الأولى من القرن العشرين. وقد درس الرياضيات في البداية، ولم يتحول إلى الفيزياء (وعمل لفترة في معامل كافنديش) إلا بعد أن أكمل الدكتوراه سنة ١٩٠٦. وقد تبين أن ذلك كان تدريبًا مثاليًّا للسنوات القادمة كما سنرى فيما بعد. وقد اتصف بورن كخبير بالنسبية، بصرامة رياضية دائمًا، على نقيض واضح من الصرح النظري المخلوط الذي شيده بور بمساعدة بصيرة نافذة وحس فيزيائي، لكنه غالبًا ما يترك للآخرين معالجة التفاصيل الرياضية، وقد كان كلا النوعين من العبقرية أساسيًّا للفهم الجديد للذرات.

كانت محاضرات بور في يونيو/حزيران سنة ١٩٢٢ حدثًا ضخمًا في سياق عملية إعادة تجديد الفيزياء الألمانية بعد الحرب، وكذلك في تاريخ نظرية الكم. حضر هذه المحاضرات علماء من جميع أنحاء ألمانيا، وقد أصبحت تعرف (بدون تلاعب بالألفاظ واستعارتها من احتفاليات ألمانية مشهورة) باسم «مهرجان بور». وقد قدم بور في تلك المحاضرات، وبعد أن أعد الأرضية بعناية، أول نظرية ناجحة للجدول الدوري للعناصر، وهي النظرية التي ظلت صالحة كما هي في الأساس حتى يومنا هذا، وقد نبعت فكرة بور من صورة الإلكترونات التي تضاف إلى نواة الذرة، ومهما كان الرقم الذري لهذه النواة، فإن أول إلكترون سيذهب إلى حالة الطاقة التي تقابل الحالة الأرضية للهيدروجين، وسيذهب الإلكترون التالي إلى حالة الطاقة. أما الإلكترون التالي فيضاف إلى نوع جديد من مستويات الطاقة وبذلك فإن الذرة التي لها ثلاثة بروتونات في النواة وثلاثة إلكترونات خارج النواة لا بد أن يوجد فيها زوج من هذه الإلكترونات مرتبطًا بقوة مع النواة وإلكترون واحد متروكًا في الخارج. ولا بد أن تسلك الذرة كما لو كان لديها إلكترون واحد (الهيدروجين) مادام كان الموضوع يتعلق بالكيمياء. والعنصر الذي له $Z = 3$ هو الليثيوم، وهو بالفعل يبدي بعض التشابه الكيميائي مع الهيدروجين. أما العنصر التالي في الجدول الدوري الذي له خصائص مماثلة لليثيوم فهو الصوديوم والذي له $Z = 11$، ويشغل ثمانية مواقع بعد الليثيوم. وهكذا دفع بور بأنه لا بد أن هناك ثمانية مواقع



شكل ٤-٢: يمكن تمثيل ذرات بعض أبسط العناصر كنواة محاطة بالإلكترونات في أغلفة تقابل درجات سلم مستويات الطاقة. ولا تسمح قواعد الكوانتم (الكم) إلا لزوج من الإلكترونات فقط في الدرجة السفلى (الأكثر انخفاضًا)، وبذلك فإن الليثيوم الذي يملك ثلاثة إلكترونات لا بد أن يضع إلكترونًا منها فوق الدرجة التالية من سلم الطاقة. وهناك «متسع» على الغلاف الثاني لثمانية إلكترونات، وهكذا فإن للكربون غلافًا نصف ممتلئ، وهو ما يمثل السبب وراء الخصائص الكيميائية المثيرة للكربون كأساس للحياة.

متاحة في مستويات الطاقة الموجودة خارج الإلكترونين الداخليين، وأنه عند امتلائهما لا بد أن يذهب الإلكترون الحادي عشر التالي إلى حالة أخرى من



شكل ٤-٣: عندما تتحد ذرة كربون بأربع ذرات من الهيدروجين، فإن الإلكترونات تقتسم بينها بالطريقة التي تجعل كل ذرة من الهيدروجين تنخدع وكأن لها غلافًا داخليًّا ممتلئًا (زوج من الإلكترونات) وتجعل كل ذرة كربون «ترى» ثمانية إلكترونات في الغلاف الثاني. وهذا الترتيب مستقر جدًّا.

حالات الطاقة أقل ارتباطًا بالنواة، ومرة أخرى تحاكي الذرة مظهر ذرة لها إلكترون واحد.

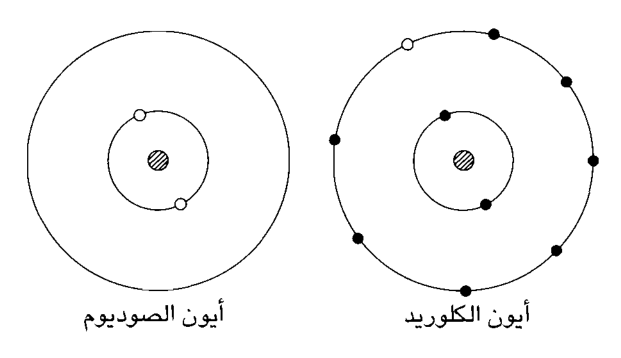
وتسمى هذه الحالات من الطاقة بـ«الأغلفة»، وقد تضمن تفسير بور للجدول الدوري الترتيب المتدرج (الملء المتدرج) للأغلفة بالإلكترونات مع الزيادة في Z ويمكن التفكير في الأغلفة وكأنها طبقات بصلة تغلف بعضها بعضًا، وكل ما يهم في الكيمياء هو عدد الإلكترونات في الغلاف الخارجي للذرة، أما ما هو تحت ذلك فيلعب دورًا ثانويًّا فقط في تحديد الكيفية التي تتفاعل بها مع الذرات الأخرى.

ومع التدرج إلى الخارج خلال الأغلفة الإلكترونية وتضمين الأدلة من دراسة الطيف، تمكن بور من تفسير العلاقات بين العناصر في الجدول الدوري بمدلول البنية الذرية. ولم يكن لديه أي فكرة عن السبب في امتلاء الغلاف بثمانية إلكترونات (غلاف مغلق)، لكنه لم يترك لأحدٍ من مستمعيه في القاعة أدنى شك في أنه قد اكتشف الحقيقة الأساسية، وكما قال هايزنبرج فيما بعد، بور«لم يبرهن على أي شيء بالرياضة ... وكان يعرف أن ذلك هو تقريبًا الارتباط.»* وقد علق أينشتاين في مذكرات السيرة الذاتية سنة ١٩٤٩ وهو يصف نجاح أبحاث بور القائمة على النظرية الكمية: «كانت هذه الأسس غير الآمنة والمتضاربة كافية لتمكن رجلًا مثل بور له هذا الحس المتفرد والبراعة أن يكتشف القوانين الرئيسية لخطوط الطيف والأغلفة الإلكترونية للذرات ويكتشف مغزاها للكيمياء، الأمر الذي بدا لى أنه معجزة وهو مازال يبدو لى كمعجزة حتى اليوم.»†

تهتم الكيمياء بالطريقة التي تتفاعل بها الذرات وتتحد لتصنع الجزئيات؛ فلماذا يتفاعل الكربون مع الهيدروجين بالطريقة التي تجعل أربع ذرات من الهيدروجين تلتصق بذرة واحدة من الكربون لتصنع جزيء الميثان؟ ولماذا يوجد الهيدروجين في صورة جزئيات، كل جزيء منها يتكون من ذرتين، ولا تكوِّن ذرات الهليوم أي جزيئات؟ وهكذا. جاءت الإجابات ببساطة مذهلة من نموذج الأغلفة: فكل ذرة هيدروجين لها إلكترون واحد، وللهليوم إلكترونان، ويمتلئ الغلاف «الداخلي» بإلكترونين، (ولسبب غير معروف) تكون الأغلفة الممتلئة أكثر استقرارًا — فالذرات «تميل» لامتلاك أغلفة ممتلئة، وعندما تتحدد ذرتان للهيدروجين لتكوين جزيء، فإنهما يقتسمان الإلكترونيين بطريقة تجعل كل ذرة تشعر بميزة الغلاف المغلق (الممتلئ)، أما الهليوم فله غلاف ممتلئ بالفعل ولذا فهو غير مهتم بأي اقتراح أو عرض مثل ذلك، ويترفع على التفاعل الكيميائي مع أي شيء.

* مستخلصة من ميهرا وروتشنبرج الجزء الأول صفحة ٣٥٧.

† Op. cit.، صفحة ٣٥٩.



شكل ٤-٤: تتوصل ذرة الصوديوم إلى الهيئة المرغوبة تبعًا لميكانيكا الكم بإعطائها الإلكترون الوحيد الخارجي، وتصبح موجبة الشحنة. ويملأ الكلور غلافه الخارجي بتقبله لإلكترون فائض ليصبح به ثمانية إلكترونات ويكتسب شحنة سالبة، وتتماسك الأيونات المشحونة بعضها مع بعض لتصنع الجزيئات وبلورات ملح الطعام (NaCl) بواسطة القوى الكهربية الاستاتيكية.

ويمتلك الكربون ستة بروتونات في نواته وستة إلكترونات خارجها، ويشغل اثنان من هذه الإلكترونات الغلاف الداخلي المغلق تاركة أربعة في الغلاف التالي، الذي هو نصف فارغ. وتستطيع الذرات الأربع للهيدروجين طلب اقتسام واحد من الإلكترونات الأربعة الخارجية لذرة الكربون والمساهمة بإلكترونها الخاص في هذه العملية، وتنتهي كل ذرة هيدروجين بغلاف ممتلئ بشكل زائف بإلكترونين داخليين، وتمتلك كل ذرة كربون الغلاف الثاني ممتلئًا بشكل زائف بثمانية إلكترونات.

ويقول بور: إن الذرات تتحد بطريقة تجعلها تحصل أقرب ما يمكن على غلاف خارجي مغلق (ممتلئ). وفي بعض الأحيان، كما في حالة جزيء الهيدروجين، من الأفضل أن نفكر في إلكترونين يتقاسمان نواتين وفي حالات أخرى تكون الصورة المناسبة أن نتخيل ذرة لها إلكترون مفرد في الغلاف الخارجي (الصوديوم ربما) ويعطي هذا الإلكترون تمامًا لذرة تملك في غلافها الخارجي سبعة إلكترونات وموقعًا واحدًا

فارغًا (في هذه الحالة قد يكون ذلك هو الكلور). وتصبح كل ذرة سعيدة؛ الصوديوم سعيد بفقد الإلكترون يترك بعدها الغلاف الداخلي ممتلئًا «الغلاف المرئي»، والكلور باكتساب إلكترون ليستكمل ملء غلافه الخارجي. وتكون المحصلة بذلك أن ذرة الصوديوم قد أصبحت أيونًا موجب الشحنة بفقده وحدة واحدة من الشحنة السالبة، وأصبحت ذرة الكلور أيونًا سالبًا، وحيث إن الشحنات المضادة تتجاذب، فإن الأيونيين يلتصقان إحداهما بالأخرى ليكونا جزيئًا متعادل الشحنة من كلوريد الصوديوم (ملح الطعام).

ويمكن تفسير كل التفاعلات الكيميائية بهذه الطريقة إما تقاسم أو مقايضة للإلكترونات بين الذرات بغرض الوصول إلى الاستقرار الذي يتصف بامتلاء الأغلفة الإلكترونية، وتنتج انتقالات الطاقة المتضمنة للإلكترونات الخارجية بصمة طيف العنصر، أما الانتقالات المتضمنة للأغلفة الداخلية (ولذلك الكثير من الطاقة وتتضمن جزءًا أشعة X من الطيف) فلا بد أن تكون هي نفسها لجميع العناصر، كما ثبت بالفعل. ومثل أفضل النظريات، فقد تأكد نموذج بور بواسطة تنبؤ موفق. ومع ترتيب العناصر في جدول دوري، وحتى سنة ١٩٢٢ كانت هناك فراغات تقابل عناصر لم تكتشف بعد لها الأرقام الذرية (٤٣، ٦١، ٧٢، ٧٥، ٨٥، ٨٧). وقد تنبأ نموذج بور بتفاصيل خصائص هذه العناصر «الغائبة» واقترح أن يكون للعنصر ٧٢ بالتحديد، خصائص مماثلة للزركونيوم وهو التنبؤ الذي يتعارض مع التنبؤات القائمة على النماذج الأخرى للذرة، وقد تحققت النبوءة في عام واحد مع اكتشاف الهافنيوم، العنصر ٧٢، الذي اتضح أن له خصائص طيفية متطابقة مع ما تنبأ به بور.

كان ذلك هو ذروة النظرية الكمية القديمة، وقد أزيحت هذه النظرية في غضون ثلاث سنوات ومع ذلك، ومادامت الكيمياء هي ما تعنينا، فأنت في حاجة إلى ما هو أكثر قليلًا من فكرة الإلكترونات التي على شكل جسيمات دقيقة تدور حول نواة الذرة في أغلفة تميل للامتلاء (أو الفراغ،

ولكن من الأفضل ألا تكون بين الحالتين).* وإذا كنت من المهتمين بفيزياء الغازات، فأنت تحتاج أكثر قليلًا من صورة الذرات ككرات بلياردو صلبة غير قابلة للتحطم. وتكفي فيزياء القرن التاسع عشر للأغراض اليومية، وتكفي فيزياء سنة ١٩٢٣ لمعظم الكيمياء، أما فيزياء الثلاثينيات من القرن العشرين فتأخذنا إلى أبعد نقطة وصلها أحد خلال البحث عن الحقيقة النهائية. وعلى مدى خمسين عامًا لم يحدث أي تقدم أو تطور فجائي يمكن مقارنته بثورة الكوانتم، وطوال هذا الوقت كانت بقية العلوم تحاول اللحاق ببصيرة حفنة من العباقرة. وقد جاء نجاح تجربة الهيئة Aspect في باريس في بداية ثمانينات القرن العشرين علامة على نهاية عصر هذا اللحاق، مع أول برهان تجريبي مباشر على أنه حتى أكثر السمات غرابة لميكانيكا الكم هي وصف بمعنى الكلمة للحالة التي عليها الأشياء في العالم الواقعي، وقد حان الوقت لنكتشف في الواقع مدى غرابة عالم الكوانتم.

* وأنا بالطبع أقوم بتضخيم بساطة الكيمياء هنا. فكلمة «أكثر قليلًا» المطلوبة لتفسير الجزيئات الأكثر تعقيدا قد تطورت في نهاية العشرينيات وبداية الثلاثينات من القرن العشرين باستخدام ثمار التطور الشامل لميكانيكا الكم. كان الشخص الذي أنجز معظم العمل هو لينوس بولنج Linus Pauling وشهرته اليوم أنه داعية سلام، والشخص الذي اقترح فيتامين C، والذي حصل على أول جائزة نوبل من الجائزتين التي حصل عليهما عن أبحاثه سنة ١٩٥٤ «عن أبحاثه في طبيعة الرباط الكيميائي وتطبيقاته التي أوضحت بنية المواد المعقدة.» وقد جرى توضيح «هذه المواد المعقدة» بمساعدة نظرية الكم، بواسطة بولينج، المتخصص في الكيمياء الفيزيائية، الذي فتح الطريق لدراسة جزيئات الحياة. وقد اعترف هوراس جادسون (Horace Judson) بالمغزى الأساسي للكيمياء الكمية للجزيئات في البيولوجيا في كتابه الملحمي «اليوم الثامن للخلق» لكن تفاصيل القصة للأسف تقع خارج مجال هذا الكتاب.

الباب الثاني

ميكانيكا الكم

«كل العلوم إما فيزياء أو جمع طوابع البريد.»

إرنست رذرفورد ١٨٧١-١٩٣٦



الفصل الخامس

الفوتونات والإلكترونات

مع نجاح بلانك وبور في الإشارة إلى الطريق المؤدى إلى فيزياء الأشياء متناهية الصغر، والتي اختلفت عن الميكانيكا الكلاسيكية، فإن ميكانيكا الكم كما نعرفها اليوم لم تبدأ إلا مع تقبل فكرة أينشتاين عن كوانتم الضوء، والتحقق من أن الضوء لا بد أن يفسر بمدلول كل من الجسيمات والموجات، ومع أن أينشتاين ذكر لأول مرة كوانتم الضوء في بحثه سنة ١٩٠٥ عن الظاهرة الفوتوكهربية، فإن الفكرة لم تقبل حتى سنة ١٩٢٣ حيث حظيت بالاحترام الواجب. وقد كان أينشتاين نفسه يتحرك بحرص، وهو يدرك تمامًا الطبيعة الثورية المتضمنة في هذا البحث، وقد أخبر المشاركين في أول مؤتمر سولفاي: «إنني أصر على الخاصية المؤقتة لهذا المفهوم، الذي لا يبدو متسقا مع التبعات المترتبة على التحقق التجريبي لنظرية الموجات.»* ومع أن ميليكان قد أثبت سنة ١٩١٥ صحة معادلة أينشتاين للظاهرة الفوتوكهربية، فإن تقبل واقعية جسيمات الضوء لا يزال يبدو غير منطقي. وفي أبحاثه سنة ١٩٤٠ لاختبار هذه المعادلة علق ميليكان قائلًا: «لقد أُكرِهت سنة ١٩١٥ أن أدافع عن عدم الالتباس والتثبت على الرغم من عدم منطقيتها ... وقد بدت وكأنها تغتصب كل شيء نعرفه عن تداخل الضوء.» وفي الوقت الذي عبر فيه عن نفسه بفاعلية ونشاط، وهو يتحدث عن التحقق التجريبي من صحة

* كانت مؤتمرات سولفاي سلسلة من اللقاءات يمولها إرنست سولفاى Ernest Solvay، الكيميائي البلجيكي الذي كون ثروة من طريقته في إنتاج كربونات الصوديوم. ولأنه كان مهتمًّا أكثر بالعلوم البحتة، قام سولفاى بتمويل هذه اللقاءات حيث كان يلتقي الفيزيائيون الرواد ويتبادلون وجهات النظر.

معادلة أينشتاين للظاهرة الفوتوكهربية، أخذ يقول: «يبدو أن المعادلة التي وصل لها أينشتاين بواسطة نظرية شبه الجسيمات semicorpuscular لا يمكن الدفاع عنها.» وقد كتب ذلك سنة ١٩١٥، وسنة ١٩١٨ علق رذرفورد بقوله إنه يبدو أنه لا يوجد «تفسير فيزيائي» للارتباط بين الطاقة والتردد التي فسرها أينشتاين منذ ثلاثة عشر عامًا ضمن فرضيته عن كوانتا الضوء. ولم يكن الأمر أن رذرفورد لا يعرف اقتراح أينشتاين، لكنه لم يقتنع به، وحيث إن كل التجارب التي صممت لاختبار نظرية الموجات للضوء قد بينت أن الضوء يتكون من موجات، كيف إذن يمكن أن يتكون الضوء من جسيمات؟*

جسيمات الضوء

سنة ١٩٠٩، وفي الوقت الذي ترك فيه أينشتاين العمل كموظف في مكتب الاختراعات وتقلد أول منصب أكاديمي كأستاذ مشارك associate professor في زيورخ، قام بخطوة ذات مغزى للأمام، عندما أشار ولأول مرة إلى «الكوانتا النقطة وطاقتها hv.» ويرمز للجسيمات مثل الإلكترونات بجسم على شكل «نقطة» في الميكانيكا الكلاسيكية، وهو الأمر الذي يبعد كل البعد عن وصف الضوء بمدلول الموجات، ماعدا أن تردد الإشعاع v لها يُنبئنا بطاقة الجسيمة، وقد قال أينشتاين سنة ١٩٠٩: «إنه رأيي» وأضاف «إن الطور القادم في تطور الفيزياء النظرية سيجيئنا بنظرية للضوء يمكن تفسيرها كنوع من الدمج بين نظريتي الموجات والانبعاث».

يضرب هذا التعليق بشكل نادر في ذلك الوقت مباشرة في قلب نظرية الكم الحديثة، وقد عبر بور في عشرينيات القرن العشرين عن الأسس الجديدة للفيزياء بمصطلح «مبدأ التكميلية» Principle of Complementarity الذي ينص على أن نظريتي الموجات والجسيمات (في هذه الحالة) لا تستبعد أي منهما الأخرى ولكن إحداهما تكمل الأخرى، وكلا المفهومين ضروري

* الاقتباسات في هذا المقطع مأخوذة من «حاذق هو الرب» لـA. Pais.

للوصف الشامل، ويتضح ذلك بشدة في الحاجة إلى قياس طاقة «جسيمات» الضوء بمدلول ترددها أو طول الموجة.

وبعد أن قال أينشتاين ملحوظاته، وفي الحال ترك التفكير الجاد في نظرية الكم في الوقت نفسه الذي طور فيه نظرية النسبية العامة، وعندما عاد إلى جماعة الكوانتم سنة ١٩١٦، كان في جعبته تطور آخر لموضوع الضوء والكوانتم، وقد ساعدت أفكاره الإحصائية، كما رأينا، في ترتيب صورة ذرة بور وتحسين وصف بلانك لإشعاع الجسم الأسود، وقد فسرت هذه الحسابات كيف ينتقل الزخم (كمية تحرك) من الإشعاع إلى المادة وهي الحسابات التي تتعلق بالطريقة التي تمتص بها المادة الإشعاع أو تبعث به، وذلك بمعلومية أن كل كوانتم من الإشعاع $h\nu$ يحمل معه الزخم (كمية تحرك) $h\nu/c$. ويرجع هذا البحث إلى موضوع بحث سابق كان أحد الأبحاث العظيمة التي صدرت سنة ١٩٠٥ حول الحركة البراونية. وكما أن ذرات الغاز أو السائل تضرب حبوب اللقاح لتبرهن حركتها على حقيقة وجود الذرات، كذلك تضرب «جسيمات» إشعاع الجسم الأسود الذرات نفسها، ولا يمكن مشاهدة الحركة البراونية للذرات والجزيئات مباشرة، لكن عمليات التصادم تتسبب في حدوث التأثيرات الإحصائية التي يمكن قياسها بمدلول الخصائص مثل ضغط الغاز، وقد كانت هذه التأثيرات الإحصائية هي التي شرحها أينشتاين بمدلول جسيمات إشعاع الجسم الأسود التي تحمل زخمًا (كمية تحرك).

غير أن التعبير نفسه عن زخم (كمية تحرك) جسيمة الضوء يجيء مباشرة من النسبية الخاصة بطريقة بسيطة جدًّا. ترتبط الطاقة (E) والزخم (كمية تحرك) (p) وكتلة السكون (m) للجسيمة في النظرية النسبية بالمعادلة البسيطة:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

وحيث إن جسيمة الضوء ليس لها كتلة سكون فإن هذه المعادلة تختزل مباشرة إلى:

$$E^2 = p^2c^2$$

أو بصورة أبسط: $p = E/c$ وقد يبدو الأمر مفاجأة أن أينشتاين استغرق كل هذا الوقت ليصل إلى ذلك، لكن في ذلك الحين كان ذهنه مشغولًا بأمور أخرى، مثل النسبية العامة. وبمجرد أن توصل إلى هذا الارتباط، ومع ذلك، فإن التوافق بين الدفوع الإحصائية والنظرية النسبية جعل الحالة أقوى كثيرًا. (ومن وجهة نظر أخرى، وحيث إن الإحصاء يبين أن $p = E/c$، يمكنك الدفع بأن المعادلة النسبية قد أرست بذلك أن جسيمات الضوء لها كتلة سكون مساوية للصفر.)

وكان هذا البحث هو الذي أقنع أينشتاين نفسه بأن كوانتا الضوء شيء حقيقي. ولم يظهر الاسم «فوتون» للدلالة على جسيمة الضوء إلا سنة ١٩٢٦ (بواسطة جيلبرت لويس Gilbert Lewis في بيركلي بكاليفورنيا)، ولم يصبح جزءًا من لغة العلوم إلا بعد مؤتمر سولفاي الخامس الذي عقد تحت عنوان «الإلكترونات والفوتونات» سنة ١٩٢٧. لكن مع أن أينشتاين كان يقف وحده سنة ١٩١٧ في اعتقاده في حقيقة ما يسمى الآن بالفوتونات، فإن ذلك كان الوقت المناسب ليقدم هذا الاسم. وقد تطلب الأمر ست سنوات أخرى قبل إيجاد إثبات تجريبي مباشر لا يقبل الجدل على حقيقة وجود الفوتونات بواسطة الفيزيائي الأمريكي آرثر كومبتون Arthur Compton.

عمل كومبتون بأشعة X منذ سنة ١٩١٣، وقد عمل في عدة جامعات أمريكية وفي معمل كافندش بإنجلترا، وقد قادته سلسلة من التجارب في بداية عشرينيات القرن العشرين إلى التوصل إلى أن التداخل بين أشعة X والإلكترونات يمكن تفسيره فقط إذا كانت أشعة X بشكل ما جسيمات — فوتونات. كانت التجارب الأساسية تعالج الطريقة التي تتشتت بها أشعة X بواسطة الإلكترون — أو بلغة الجسيمات — الطريقة التي يتداخل بها الفوتون والإلكترون عندما يصطدمان؛ فعندما يضرب فوتون أشعة X إلكترونًا، يكتسب الإلكترون طاقة وزخمًا (كمية تحرك) ويتباعد بزاوية مع مساره السابق. أما الفوتون نفسه فيفقد طاقة وزخمًا (كمية تحرك) ويتباعد بزاوية مختلفة يمكن حسابها من القوانين البسيطة لفيزياء الجسيمات. ويشبه هذا التصادم تأثير كرة البلياردو المتحركة على كرة ثابتة،

ويحدث انتقال الزخم (كمية تحرك) بالطريقة نفسها بالضبط، وفي حالة الفوتون فإن فقد الطاقة يعني تغير تردد الإشعاع بمقدار $h\nu$ التي اكتسبها الإلكترون، ونحتاج إلى الوصفين، كجسيمة وكموجة للتوصل إلى التفسير الكامل للتجربة. وعندما أجرى كومبتون هذه التجارب اكتشف أن التداخل يسلك بالضبط في توافق مع هذا الوصف، وقد اتفقت تمامًا زوايا التشتت، وتغيرات طول الموجة، وارتداد الإلكترون مع فكرة أن أشعة X تجيء في شكل جسيمات طاقتها $h\nu$. وتسمى هذه الظاهرة الآن بتأثير كومبتون، وقد حصل كومبتون سنة ١٩٢٧ على جائزة نوبل على هذه الأبحاث.* وقد استقرت حقيقة أن الفوتونات جسيمات تحمل الطاقة والزخم (كمية تحرك) بعد سنة ١٩٢٣ (على الرغم من أن بور ناضل بشدة لفترة محدودة ليجد تفسيرًا بديلًا لظاهرة كومبتون؛ ولم يكن يرى في الحال الحاجة إلى تضمين كلٍّ من وصف الجسيمة ووصف الموجة في نظرية جيدة للضوء، وكان يرى نظرية الجسيمات كمنافس لنظرية الموجات المتضمنة في نموذجه للذرة). غير أن كل البراهين على الطبيعة الموجية للضوء قد صمدت. وكما قال أينشتاين سنة ١٩٢٤: «وبذلك فإن هناك نظريتين للضوء، وكلاهما أساس لا غنى عنه ... بلا أي رابطة منطقية».

وقد شكل الارتباط بين هاتين النظريتين الأساس الذي تطورت به ميكانيكا الكم في السنوات المحمومة التالية، وكان التقدم يحدث على جبهات مختلفة ومتعددة في الوقت نفسه، وكانت الأفكار والاكتشافات الجديدة لا تأتي بإحكام وترتيب حسب الحاجة إليها لبناء الفيزياء الجديدة. وحتى تكون القصة متماسكة، لأبد أن أجعل التقرير أكثر ترتيبًا من العلم نفسه في ذلك الزمن، وأحد الطرق المؤدية لذلك هي إعداد الأرضية البحثية من المفاهيم المناسبة قبل وصف ميكانيكا الكم نفسها، حتى وإن كانت نظرية الكم قد بدأت تتطور قبل إدراك بعض هذه المفاهيم. ولم يكن قد اعترف بتضمينات

* حسب العالم النظري بيتر دبباي (Peter Debye) «تأثير كومبتون» مستقلًّا في الوقت نفسه تقريبًا، ونشر بحثه الذي اقترح فيه تجربة لاختبار الفكرة. وفي الوقت الذي نشرت فيه هذه المقالة كان كومبتون قد أجرى التجربة بالفعل.

ازدواجية الجسيمة/الموجة عندما بدأت ميكانيكا الكم تتخذ شكلها، غير أنه في أي وصف منطقي لنظرية الكم، فإن الخطوة التالية بعد اكتشاف الطبيعة الازدواجية للضوء لا بد أن تكون اكتشاف الطبيعة الازدواجية للمادة.

ازدواجية الجسيمة/الموجة

ظهر هذا الاكتشاف من اقتراح قدمه نبيل فرنسي هو لويس دي برويل Louis de Broglie. ومع أنه بسيط فإنه يضرب في عمق المادة. ويمكننا تخيل دي برويل وهو يتأمل: «إذا كانت موجات الضوء تسلك مثل الجسيمات، فلماذا لا تسلك الإلكترونات أيضًا مثل الموجات؟» ولو توقف دي برويل عند هذا الحد، فمن الطبيعي أنه لم يكن ليذكر كواحد من مؤسسي نظرية الكوانتم، ولا كان سيحصل على جائزة نوبل سنة ١٩٢٩. ولو كانت الفكرة مجرد تخمين تافه لما كان لها قيمة تذكر، فقد وردت تخمينات شبيهة تتعلق بأشعة X منذ فترة طويلة سابقة على أبحاث كومبتون، على الأقل سنة ١٩١٢، عندما قال الفيزيائي العظيم براج W. H. Bragg (وهو الآخر حاصل على جائزة نوبل) عن حالة فيزياء أشعة X في ذلك الزمن: «تصبح المشكلة فيما يبدو لي ليس الاختيار بين نظريتين عن أشعة X، ولكن اكتشاف ... نظرية واحده لها المقدرة على استيعاب الاثنين.»* وكان إنجاز دي برويل هو تناول فكرة ازدواج الجسيمة/الموجة ومعالجتها رياضيًّا، واصفًا كيفية سلوك موجات المادة، ومقترحًا الطرق التي يمكن بواسطتها مشاهدة الموجات، وكانت له ميزة كبرى كعضو شاب نسبيًّا في مجتمع الفيزيائيين النظريين، وهي أخوه الأكبر موريس Maurice، الذي كان فيزيائيًّا تجريبيًّا مبجلًا، والذي وجه وقاد خطواته نحو هذا الاكتشاف، وقد قال لويس دي برويل فيما بعد إن موريس قد أكد له في المناقشات «أهمية حقيقة السمات المزدوجة للجسيمات والموجات وعدم جدوى إنكارها.» كان قد آن أوان هذه الفكرة، وكان لويس دي برويل محظوظًا «وجوده في الجوار» في ذلك الوقت، عندما أصبح من

* الاقتباسات من كتابات دي برويل وبراج مأخوذة من «التطور المفهومي لميكانيكا الكم» لماكس جامير.

الممكن أن تؤدي قطعة صغيرة من الحدس إلى نقل الفيزياء النظرية (تطوير الفيزياء النظرية)، وهو بالتأكيد قد أنجز معظم الوثبة الحدسية.

ولد دي برويل سنة ١٨٩٢، وكانت تقاليد الأسرة تقتضي توجيهه للخدمة المدنية، لكنه عندما التحق بالجامعة في باريس سنة ١٩١٠ توهجت نفسه إلى الاهتمام بالعلوم، وعلى وجه الخصوص ميكانيكا الكم، وهي العالَم الذي فتحه له جزئيًّا أخوه (أكبر منه بسبعة عشر عامًا) الذي حصل على الدكتوراه سنة ١٩٠٨، وكان ينقل للويس أخبار أول مؤتمر انعقد باسم سولفاي بوصفه أحد السكرتاريين العلميين لهذا المؤتمر. لكن بعد عامين انقطعت دراسته للفيزياء بسبب الخدمة العسكرية الإلزامية سنة ١٩١٣، التي كان من المفترض أن تكون فترة قصيرة، إلا أنها امتدت حتى سنة ١٩١٩ بسبب الحرب العالمية الأولى. وقد قام دي برويل بإعادة التقاط الخيوط بعد الحرب وعاد لدراسة نظرية الكم، واتجه في دراسته على طول الخطوط التي كانت ستؤدي به إلى اكتشافه عن وحدة نظريتي الجسيمات والموجات في الأساس، وقد جاء التقدم الفجائي سنة ١٩٢٣ عندما نشر ثلاث مقالات علمية حول طبيعة كوانتا الضوء في المجلة الفرنسية كومبت رندو Comptes Rendus وكتب ملخصًا بالإنجليزية لهذه الأبحاث ظهر في المجلة الفلسفية Philosophical Magazine في فبراير/شباط ١٩٢٤. ولم تترك هذه النشرة القصيرة أثرًا يذكر، إلا أن دي برويل بدأ في الحال في ترتيب ونشر أفكاره في صورة أكثر شمولية في رسالته للدكتوراه. وقد عقد امتحانه في السوربون في نوفمبر/تشرين الثاني ١٩٢٤ ونشرت الرسالة في أوائل سنة ١٩٢٥، في حوليات الفيزياء Annales de Physique. وكانت الرسالة في صورة جعلت أبحاثة تصبح أوضح وتشغل واحدًا من أكبر تقدم حدث في الفيزياء في العقد الثالث من القرن العشرين (عشرينيات القرن).

بدأ دي برويل رسالته بالمعادلتين اللتين استنتجهما أينشتاين لكوانتا الضوء:

$$E = h\nu; \qquad p = h\nu / c$$

وفي هاتين المعادلتين تظهر الخصائص التي «تنتمي» إلى الجسيمات (الطاقة والزخم (كمية تحرك)) إلى اليسار، وتظهر الخصائص التي «تنتمي» إلى الموجات (التردد) إلى اليمين. وقد دافع بأن فشل التجارب في إقرار — مرة وإلى الأبد — هل الضوء موجة أو جسيمة، لا بد أن يكون راجعًا إلى استحالة التخلص من تعلق الاثنين إحداهما بالأخرى، حتى إن قياس خاصية الجسيمة، الزخم (كمية تحرك)، تتطلب معرفة خاصية موجية تسمى التردد، ومع ذلك فإن هذه الازدواجية لا تنطبق فقط على الفوتونات؛ فقد كان من المعتقد في وقت من الأوقات أن الإلكترونات جسيمات طيبة حسنة السلوك، فيما عدا الطريقة الغريبة التي تشغل بها مستويات الطاقة المتميزة داخل الذرة. وقد أيقن دي برويل أن حقيقة وجود الإلكترونات في «مدارات» تتحدد بأرقام صحيحة (كاملة) تشبه كذلك وبطريقة ما خاصية موجية، وقد كتب في رسالته: «إن الظواهر الوحيدة التي تتضمن أرقامًا صحيحة (كاملة) في الفيزياء هي تلك المتعلقة بتداخل الأنساق العادية للذبذبة، وتقترح عليَّ هذه الحقيقة فكرة أن الإلكترونات هي الأخرى لا يمكن اعتبارها ببساطة مجرد جسيمات، لكنها لا بد أن تتصف كذلك بدورية الخصائص.»

«والأنساق العادية للذبذبة» هي ببساطة الذبذبات التي تصنع في وتر الكمان أو موجة الصوت في أنبوبة الأرغن؛ فمن الممكن أن يتذبذب وتر مشدود بقوة مثلًا بالشكل الذي يكون فيه طرفاه مثبتين ويهتز وسط الوتر تذبذبًا للأمام وللخلف، وإذا لمست منتصف الوتر فسيهتز كل نصف متذبذبًا بالشكل نفسه ويثبت المنتصف، وهذا «النسق» الأعلى من الذبذبة يقابل نوتة أعلى، نغمة، من الوتر كله. وفي الحالة الأولى يبلغ طول الموجة ضعف طولها في الحالة الثانية، ويمكن أن تتضمن الأنساق الأعلى من الذبذبات بشرط أن تكون أطوال الوتر مضاعفات صحيحة لأطوال الموجات دائمًا (١، ٢، ٣، ٤، وهكذا). وبعض الموجات فقط ذات الترددات المعينة هي التي تتفق مع الوتر.

ويشبه ذلك في الحقيقة الطريقة التي تقابل فيها الإلكترونات في الذرة حالات مستويات طاقة كمية ١، ٢، ٣، ٤، وهكذا. وبدلًا من وتر مستقيم

مشدود تخيل وترًا قد انثنى على نفسه على شكل «مدار» حول الذرة، وتجري الذبذبة الثابتة مستقرة حول الوتر بشرط أن يكون طول المحيط مضاعفات صحيحة لأطوال الموجة. أما إذا كانت الموجة لا تتفق بدقة مع الوتر بالشكل المذكور، فإن الموجة لن تكون ثابتة وستتلاشى لأنها ستتداخل مع نفسها، ولا بد لرأس الحية أن تمسك بذيلها، وإلا سينهار الوتر الذي شبهناه هنا بالحية. فهل يفسر ذلك كنتمة حالات الطاقة في الذرة، بحيث تقابل كل حالة رنين موجة إلكترون له تردد معين؟ ومثل تشبيهات قائمة عديدة على ذرة بور — في الحقيقة، ومثل كل الصور الفيزيائية للذرة — فإن الصورة بعيدة عن الحقيقة، لكنها ساعدت في محاولة فهم أفضل لعالم الكم.

موجات الإلكترون

كان دي برويل يفكر في الموجات على أنها مرافقة للجسيمات، وقد اقترح أن جسيمة مثل الفوتون في الحقيقة تقودها في طريقها الموجة المرتبطة بها، وجاءت النتيجة وصفًا رياضيًّا تفصيليًّا ودقيقًا لسلوك الضوء، الذي تضمن البرهان من تجارب كل من الموجات والجسيمات، وقد أعجب المتحنون الذين فحصوا رسالة دي برويل بالرياضة، لكنهم لم يصدقوا الاقتراح بأن الموجات المشابهة التي ترافق جسيمة مثل الإلكترون لها أي معنى فيزيائي، وقد اعتبروها مجرد مراوغة رياضية. لم يوافق دي برويل على ذلك، وعندما سأل أحد المتحنين عما إذا كان من الممكن تصميم تجربة تكشف موجات المادة، أجاب بأنه لا بد أن يكون من الممكن الوصول إلى المشاهدات المطلوبة بواسطة حيود شعاع من الإلكترونات الصادرة من بلورة، وتشبه هذه التجربة تمامًا حيود الضوء من خلال منظومة من الشقوق وليس مجرد شقين اثنين، على أن تعمل الفجوات بين الذرات المتباعدة بانتظام في البلورة منظومة من «الشقوق» ضيقة بما فيه الكفاية لتتسبب في حيود الإلكترونات عالية التردد (أطوال موجات صغيرة مقارنه بالضوء أو حتى بأشعة X).

كان دي برويل يعلم طول الموجة الذي يبحث عنه، حيث إنه بدمج معادلتي أينشتاين لجسيمات الضوء، حصل على العلاقة البسيطة جدًّا $p = h\nu/c$، التي قابلتنا من قبل، وحيث إن علاقة طول الموجة بالتردد هي $\lambda = c/\nu$، فإن ذلك يعني $p\lambda = h$، أي بلغة مباشرة بضرب طول الموجة في الزخم (كمية تحرك) ينتج ثابت بلانك. وكلما كان طول الموجة أصغر، كان زخم (كمية تحرك) الجسيمة أكبر، ويجعل ذلك الإلكترونات التي لها كتلة صغيرة وبالتالي زخم (كمية تحرك) صغير، أكثر الجسيمات المعروفة وقتها «شبهًا بالموجات». وكما في حالة الضوء بالضبط، أو الموجات التي على سطح البحر، يظهر تأثير الحيود فقط إذا عبرت الموجة من ثقب أصغر كثيرًا من طولها، وبالنسبة لموجات الإلكترونات فإن ذلك يعنى ثقبًا صغيرًا جدًّا في الواقع، يقارب حجم الفجوات بين الذرات في البلورة.

أما ما كان لا يعلمه دي برويل فهو أن التأثيرات التي يمكن تفسيرها أفضل ما يمكن بمدلول حيود الإلكترونات قد لوحظت عندما استخدمت أشعة من الإلكترونات لاختبار البلورات منذ سنة ١٩١٤. فقد قام فيزيائيان أمريكيان هما كلينتون دافيسون Clinton Davisson وزميله تشارلز كونسمان Charles Kunsman بدراسة هذا السلوك المتميز للإلكترونات التي تتشت من البلورات أثناء سنتي ١٩٢٢، ١٩٢٣ في الوقت الذي كان فيه دي برويل يصيغ أفكاره. وقد حاول دي برويل تتبع التجارب بإجراء اختبار لفرضية «إلكترون-موجة» جاهلًا بكل ذلك. وفي هذه الأثناء أرسل المشرف على رسالة دي برويل بول لانجفين Paul Langevin نسخة من الأبحاث إلى أينشتاين الذي رأى فيها، للمفاجأة، أكثر كثيرًا من مجرد حيلة رياضية أو تشابهًا، وأيقن أن موجات المادة لا بد أن تكون حقيقية. وقد قام بدوره بإرسال هذه الأخبار إلى ماكس بورن في جوتنجن، حيث كان رئيس قسم الفيزياء التجريبية جيمس فرانك James Franck وقد علق على تجارب دافيسون قائلًا: «لقد أرسى بالفعل وجود التأثير المتوقع!».*

* راجع جامر Jammer، Op. cit.

كان دافيسون وكونسمان يعتقدان مثل الفيزيائيين الآخرين أن تأثير التشتت سببه يكمن في بنية الذرات التي تُقذف بالإلكترونات، وليس بسبب طبيعة الإلكترونات نفسها، وقد نشر والتر إلساسير Walter Elsasser أحد تلاميذ بورن، مذكرة صغيرة يشرح فيها نتائج هذه التجارب بمدلول موجات الإلكترونات سنة ١٩٢٥، إلا أن التجريبيين لم يتأثروا بهذه الإعادة لتفسير بياناتهم بواسطة أحد النظريين، وبالذات ليس بواسطة طالب مجهول عمره واحد وعشرون عامًا. وحتى سنة ١٩٢٥، ومع وجود دليل تجريبي، فإن فكرة وجود موجات مادية ظلت فكرة مبهمة ليس أكثر، ولم يشعر التجريبيون بالضرورة الملحة لاختبار موجات الإلكترونات بواسطة تجارب الحيود إلا عندما توصل إيرفين شرودنجر Erwin Schrödinger فقط إلى نظرية جديدة لبناء الذرة متضمنة أفكار دي برويل وتخطتها كثيرًا. وعندما تم إنجاز التجارب سنة ١٩٢٧، ثبت أن دي برويل كان على صواب تام؛ فالإلكترونات تحيد بواسطة الشبكة البلورية كما لو كانت شكلًا من أشكال الموجات، وقد اكتشف ذلك بواسطة مجموعتين مستقلتين سنة ١٩٢٧، دافيسون وزميل جديد هو ليستر جيرمر Lester Germer في الولايات المتحدة، وجورج طومسون (ابن ج. ج. طومسون) وتلميذه في الأبحاث ألكسندر ريد Alexander Reid اللذين كانا يعملان في إنجلترا مستخدمين تقنية جديدة. وقد فوت دافيسون فرصته في الحصول منفردًا على إكليل المجد، واقتسم جائزة نوبل لسنة ١٩٣٧ في الفيزياء مع طومسون عن دراسته المستقلة وذلك لأنه لم يتقبل حسابات إلساسير ويقيمها بما تستحق. ويعطينا ذلك ملحوظة تاريخية رائعة، كان دافيسون سيرحب بها أيضًا، وهي تجمع بدقة كل السمات الأساسية لنظرية الكم.

سنة ١٩٠٦ حصل ج. ج. طومسون على جائزة نوبل لأنه أثبت أن الإلكترونات جسيمات، وسنة ١٩٣٧ شهد بنفسه كيف حصل ابنه على جائزة نوبل لأنه أثبت أن الإلكترونات موجات. وقد كان الأب والابن كلاهما على صواب، وكانا يستحقان الجائزتين؛ فالإلكترونات جسيمات، والإلكترونات موجات. وبدءًا من سنة ١٩٢٨ أصبحت الأدلة التجريبية على ازدواجية دي

برويل الموجة/الجسيمة هي الطاغية، وقد وجد أن جسيمات أخرى بما في ذلك البروتون والنيوترون،* تمتلك بالتالي خصائص موجية تتضمن الحيود. وقد قام توني كلاين Tony Klein ورفاقه بإجراء سلسلة من التجارب الجميلة في أواخر سبعينيات وثمانينيات القرن العشرين في جامعة ملبورن أعادوا فيها بعض التجارب الكلاسيكية التي أرست نظرية الموجات للضوء في القرن التاسع عشر لكن باستخدام شعاع من النيوترونات بدلًا من شعاع الضوء.†

القطيعة مع الماضي

تجيء القطيعة الكاملة مع الفيزياء الكلاسيكية مع التحقق من أنه ليست الفوتونات والإلكترونات فقط لكن كل «الجسيمات» وكل «الموجات» هي في الحقيقة خليط من الموجات والجسيمات. وكل ما حدث هو أن مكون الجسيمة يطغى على الخليط في حالة كرة البولينج، مثلا، أو المبنى. لكن مازالت السمة الموجية هنالك تبعًا للعلاقة $p\lambda = h$، مع أنها مهملة القيمة. أما في عالم الأشياء الصغيرة جدًّا، حيث للسمة الموجية ولسمة الجسيمة الأهمية نفسها في الواقع، فإن الأشياء لا تتصرف بالطريقة التي يمكن أن ندركها من خبرتنا في عالم الحياة اليومية. وليس الأمر مجرد صورة زائفة لذرة بور «بمداراتها» للإلكترونات، لكن كل الصور زائفة، وليس في مقدورنا إيجاد تشابه فيزيائي يمكننا من فهم ما يحدث داخل الذرات؛ فالذرات تسلك مثل الذرات، ولا شيء آخر.

وقد لخص سير آرثر إدينجتون Arthur Eddington الموقف بطريقة رائعة في كتاب طبيعة العالم الفيزيائي The Nature of the Physical world المنشور سنة ١٩٢٩، فقد قال: «لا يوجد تصور يمكن نسجه حول

* الذي كُشف عنه أول مرة فقط سنة ١٩٣٢ بواسطة جيمس تشادويك James Chadwick الذي حصل على جائزة نوبل نتيجة لذلك سنة ١٩٣٥، أي قبل عامين كاملين من الاعتراف بأبحاث دافيسون وطومسون.

† تملك هذه التجارب إمكانية التطبيق العملي الذي ينص على احتمال تصميم «ميكروسكوب نيوتروني». راجع نيوساينتس (New Scientist)، عدد ٢ سبتمبر ١٩٨٢ صفحة ٦٣١.

الإلكترون.» أما أفضل ما يمكن أن توصف به الذرة فيوجز في «شيء ما مجهول يعمل ما نجهله.» وقد لاحظ أن «ذلك لا يبدو كنظرية مضيئة بالتحديد» وقد قرأت شيًا مماثلًا في مكان آخر:

The slithy toves
Did gyre and gimbal in the wabe*

غير أن الموضوع هو مع أننا لا نعلم ما الذي تفعله الإلكترونات في الذرات، لكننا نعرف أن عدد الإلكترونات هام، فبإضافة بضعة أعداد يمكن أن تثار الثرثرة العلمية: «ثمانية من تلك التي تلف وتنزلق وتدور في الأكسجين ... فإذا هرب أحد هذه الثمانية فإن الأكسجين سيتخفى في زي النيتروجين».

هذه الملحوظة ليست طرفة، وإذا عرف العدد وكان ثابتًا لا يتغير، كما أشار إدنجتون منذ أكثر من خمسين سنة، فإن كل أساسيات الفيزياء يمكن ترجمتها إلى مجرد «ثرثرة». ولن نخسر المعنى، بل من الممكن تصور الفائدة العظيمة إذا قطعنا الصلة مع الترافق الحدسي في أذهاننا عن الذرات التي على شكل كرات صلبة والإلكترونات التي على شكل جسيمات دقيقة، ويصبح الأمر واضحًا بواسطة اللبس الذي يحيط بإحدى خصائص الإلكترون التي تسمى «الحركة المغزلية» Spin، ولكنها لا تشبه بأي شكل سلوك «نحلة» الأطفال وحركتها المغزلية، أو دوران الأرض حول محورها أثناء دورانها حول الشمس.

ويتضمن أحد الألغاز في الطيف الذري — الذي فشل نموذج بور البسيط للذرة في تفسيره — انقسام خطوط الطيف التي كانت لا بد أن تكون غير منقسمة إلى عدة خطوط متقاربة، ولأن كل خط من خطوط الطيف يصاحب الانتقال من حالة للطاقة إلى حالة أخرى، فإن عدد خطوط الطيف يبين عدد حالات الطاقة الموجودة في الذرة؛ عدد «الخطوات» الموجودة على سلم الكم، وعمق كل خطوة. وقد توصل فيزيائيون في أوائل عشرينيات القرن

* المترجمان: هراء وكلام بلا معنى.

العشرين إلى عدة تفسيرات محتملة للبنية المتضاعفة وذلك من دراساتهم للطيف، وقد ثبت أن أفضل تفسير يرجع إلى وولفجانج باولي الذي تضمن وصف الإلكترون بأربعة أعداد كمية منفصلة، وقد حدث ذلك سنة ١٩٢٤ عندما كان الفيزيائيون لا يزالون يعتقدون أن الإلكترون جسيمة، وحاولوا تفسير الخصائص الكمية بمدلول الأمور المألوفة من عالم الحياة اليومية. كانت ثلاثة من هذه الأعداد متضمنة بالفعل في نموذج بور، وكان الاعتقاد انها تصف الزخم (كمية تحرك) الزاوى للإلكترون (السرعة التي يدور بها في مداره) وشكل المدار، واتجاهه. وكان على العدد الرابع أن يترافق مع خاصية ما أخرى للإلكترون، وهي الخاصية التي تجئ في احتمالين اثنين فقط، لتفسير الانشطار المشاهد في خطوط الطيف.

ولم يستغرق الأمر طويلًا ليتعلق الناس بفكرة العدد الكمي الرابع لباولي الذي يصف حركة الإلكترون «المغزلية» التي يمكن اعتبارها تشير إلى أعلى أو إلى أسفل، مما يجعل العدد الكمي ذا قيمتين. كان أول من اقترح ذلك هو رالف كرونيج Ralph Kronig الفيزيائي الشاب الذي كان يزور أوربا بعد انتهائه من دراسته للدكتوراه في جامعة كولومبيا.* وقد اقترح أن يكون للإلكترون حركة مغزلية ذاتية إما أن تكون موازية للمجال المغناطيسي للذرة أو عكس هذا الاتجاه قيمته نصف الوحدة الطبيعي $(h/2\pi)$.† وللمفاجأة قاوم باولي الفكرة بشدة، على الأغلب لأنها غير متفقة مع فكرة الإلكترون الجسيمة في إطار النظرية النسبية. وكما أن الإلكترون الذي يدور في مدار حول النواة «يجب» ألا يكون مستقرًّا تبعًا للنظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية، كذلك فإن الإلكترون في حركة مغزلية «يجب» ألا يكون مستقرًّا تبعا للنظرية النسبية. وربما كان على باولي أن يكون أكثر تفتحًا ذهنيًّا، لكن كرونيج تخلى عن الفكرة ولم ينشرها أبدًا. وبعد أقل من عام، جاءت

* كان آرثر كومبتون في الواقع قد خمن أن الإلكترون لا بد أن تكون له حركة مغزلية وذلك سنة ١٩٢٠، غير أن هذه الفكرة كانت قد أذيعت (نشرت) ضمن سياقات مختلفة. ولم يكن كرونيج على علم بها.

† تجيء 2π لأن هذا هو عدد الزوايا نصف القطرية في الدائرة الكاملة ٣٦٠° وأما الوحدة الأساسية $h/2\pi$ فتكتب عادة $\hbar$. وسنتناول المزيد عن هذا فيما بعد.

الفكرة نفسها من كل من جورج أولنبيك George Uhlenbeck وصمويل جودسميت Samuel Goudsmit من معهد الفيزياء النظرية في ليدن، وقد نشرا الاقتراح في المجلة الألمانية Die Naturwissenschaften أواخر سنة ١٩٢٥، وفي مجلة نيتشر Nature سنة ١٩٢٦.

وسرعان ما نُقِّحَت نظرية الإلكترون ذي الحركة المغزلية ليفسر نهائيًّا مشكلة انشطار خطوط الطيف، وبحلول مارس/آذار ١٩٢٦ أصبح باولي نفسه مقتنعا بها. لكن ما الشيء المسمى الحركة المغزلية (Spin)؟ إذا حاولت تفسيرها باللغة العادية، فإن المفهوم مثله مثل بقية مفاهيم الكم سينزلق بعيدًا، وقد يقال لك في أحد «التفسيرات» مثلًا (بالضبط ... كما إلى المدى الذي تصل إليه) أن الحركة المغزلية للإلكترون ليست مثل رأس الطفل لأن الإلكترون لا بد أن يدور مغزليًّا مرتين ليعود إلى نقطة البداية، ومرة أخرى، كيف يمكن لموجة الإلكترون أن تدور مغزليًّا بأي شكل؟ ولم يكن أحد في سعادة باولي عندما تمكن بور سنة ١٩٣٢ من التوصل إلى أن الحركة المغزلية للإلكترون لا يمكن قياسها بواسطة أي تجربة كلاسيكية، مثل انكسار أشعة الإلكترونات بواسطة مجال مغناطيسي. ولا تظهر هذه الخاصية إلا في التداخلات الكمية مثل تلك التي ينتج عنها انشطار خطوط الطيف، وليس لها أي معنى كلاسيكي بأي شكل من الأشكال. وكم كان الأمر سيصبح سهلًا لباولي ورفاقه — الذين ناضلوا ليفهموا الذرة في عشرينيات القرن العشرين — لو أنهم تحدثوا عن الإلكترون الذي يدور «حلزونيًّا» بدلًا من «مغزليًّا» في المقام الأول.

وللأسف فقد تعثرنا والتصقنا بالمصطلح «سبين Spin» (الحركة المغزلية) الآن، ولا يمكن أن تنجح المحاولات التي تبذل لإبطال استخدام المصطلحات الكلاسيكية في فيزياء الكم. ومن الآن فصاعدًا، إذا لصقت بك كلمة مألوفة ظهرت في سياق غير مألوف، فما عليك إلا محاولة تغييرها بالثرثرة ثم النظر إليها لترى ما إذا أصبحت أقل جلبًا للهلع، فلا أحد يفهم ما الذي يحدث «في الوقع» داخل الذرات، لكن أعداد باولي الكمية الأربعة تفسر في الحقيقة بعض السمات الحرجة للطريقة التي «تنزلق وتتلوى بها الأمور».

باولي والاستثناء

كان ولفجانج باولي واحدًا من أعظم المتميزين من المجموعة المتميزة من العلماء الذين أسسوا نظرية الكم؛ ولد في فينا سنة ١٩٠٠، والتحق بجامعة ميونيخ سنة ١٩١٨ وقد رافقته سمعته بأنه نضج مبكرًا في الرياضيات وأنهى بحثًا نشرة في يناير ١٩١٩ عن النسبية العامة، الأمر الذي أثار انتباه أينشتاين في الحال. وقد تشبع بالفيزياء من دروس الجامعة ومعهد الفيزياء النظرية، ومن قراءاته، وكان تمكنه في النسبية عظيمًا للدرجة التي كلف فيها بمهمة كتابة مقال شامل Review رئيسي عن هذا الموضوع سنة ١٩٢٠ في موسوعة مخصصة للرياضيات، وقد سبب هذا المقال المتقن شهرة عالمية واسعة للطالب ذي الواحد والعشرين ربيعًا في المجتمع العلمي. وقد أطرى مؤيدو ماكس بورن هذا المقال إطراءً شديدًا، بورن الذي التحق به باولي في جوتنجن سنة ١٩٢١ كمساعد. وسرعان ما انتقل من جوتنجن إلى هامبورج أولًا ثم بعد ذلك إلى معهد بور في الدنمارك. غير أن بورن لم يتأثر من فقد باولي؛ فمساعده الجديد كان فيرنر هايزنبرج Werner Heisenberg، كان موهوبًا ولعب دورًا محوريًّا في تطوير نظرية الكم.*

وحتى قبل أن يحمل عدد باولي الكمي الرابع اسم «سبين-المغزلي»، فقد تمكن باولي سنة ١٩٢٥ من استخدام حقيقة وجود أربعة أعداد ليحل إحدى أكبر المعادلات في ذرة بور؛ ففي حالة الهيدروجين يستقر الإلكترون الوحيد طبيعيًّا في أدنى حالة متاحة من الطاقة في قاع سلم الكم، فإذا أثير هذا الإلكترون — ربما بالصدام — فقد يقفز إلى درجة أعلى من السلم، ثم يسقط عائدًا إلى الحالة الأرضية مشعًّا كوانتم من الإشعاع أثناء ذلك. لكن عند إضافة المزيد من الإلكترونات لهذه المنظومة، وذلك في الذرات الأثقل، فإنها لا تسقط كلها عائدة إلى الحالة الأرضية، ولكنها تتوزع على درجات

* راجع مثلًا «خطابات بورن-أينشتاين» يقول بورن في خطاب بتاريخ ١٢ فبراير/شباط ١٩٢١: «يبدو أن المقال الشامل للموسوعة قد انتهى منه باولي، ويبلغ وزنة ٢/ ٢١ كيلوجرام. ولا بد أن يدل ذلك على وزنه الثقافي. وهذا الشاب الصغير ليس ماهرًا فحسب بل مجد كذلك.» وقد حصل هذا الشاب الصغير على درجة الدكتوراة سنة ١٩٢١، أي قبل فترة وجيزة من عمله مع بورن.

السلم. كان بور يتحدث عن الإلكترونات على أنها في «أغلفة» حول النواة، وتذهب الإلكترونات «الجديدة» إلى الغلاف الأقل طاقة حتى يمتلئ، ثم تبدأ في ملء الغلاف التالي، وهكذا، وبهذه الطريقة قام بور ببناء الجدول الدوري للعناصر وفسر الكثير من الأسرار الكيميائية، لكنه لم يشرح لماذا وكيف يصبح الغلاف ممتلئًا، ولماذا يحتوي الغلاف الأول على إلكترونين فقط، ويحتوي الغلاف الثاني على ثمانية، وهكذا.

ويقابل كل غلاف من أغلفة بور فئة من الأعداد الكمية، وقد أيقن باولي سنة ١٩٢٥ أنه بإضافة عدده الكمي الرابع للإلكترون، فإن عدد الإلكترونات في غلاف ممتلئ يقابل عدد الفئات المختلفة للأعداد الكمية التي تنتمي لهذا الغلاف، وقد صاغ ما أصبح معروفًا الآن باسم مبدأ الاستثناء لباولي، الذي ينص على أنه لا يمكن أن يكون لإلكترونين الفئة نفسها من الأعداد الكمية، وهكذا زودنا بالسبب للطريقة التي تمتلئ بها الأغلفة في الذرات كلما ازدادت ثقلًا.

وقد جاء كل من مبدأ الاستثناء واكتشاف الإلكترون قبل أوانهما في الواقع، ولم يتوافق وضعهما في الفيزياء الجديدة إلا في نهاية العشرينيات من القرن العشرين، بعد أن تأسست الفيزياء الجديدة نفسها. ونتيجة للتقدم الذي حدث دون تردد أو توان للفيزياء في سنتي ١٩٢٥، ١٩٢٦، فإن أهمية مبدأ الاستثناء قد أغفلت أحيانًا، لكنه في الحقيقة، مفهوم أساسي له تأثير بالغ يماثل تأثير النسبية، وله تطبيقات واسعة في الفيزياء. وينطبق مبدأ باولي للاستثناء، كما تبين، على جميع الجسيمات التي لها مقدار الحركة المغزلية (سبين) نضيف عددًا صحيحًا — $(1/2)\hbar$، $(3/2)\hbar$، $(5/2)\hbar$ وهكذا. أما الجسيمات التي ليس لها حركة مغزلية بالمرة (مثل الفوتونات) أو لها قيم من أعداد صحيحة ($\hbar$، $2\hbar$، $3\hbar$ وهكذا) فإنها تسلك بطريقة مختلفة تمامًا متبعة في ذلك فئة مختلفة من القواعد. وتسمى القواعد التي تخضع لها الجسيمات ذات الـ«سبين» نصف عدد صحيح، بإحصاء فيرمي-ديراك (Fermi-Dirac Statistics)، على شرف إنريكو فيرمي وبول ديراك اللذين توصلا إليها سنتي، ١٩٢٥، ١٩٢٦، وتسمى هذه الجسيمات فيرميونات Fermions،

وتسمى القواعد التي تخضع لها الجسيمات ذات السبين أعدادًا صحيحة، بإحصاء بوز-أينشتاين (Bose-Einstein) على شرف الرجلين اللذين توصلا إليها، أما الجسيمات نفسها فتسمى بوزونات Bosons.

تطور إحصاء بوز-أينشتاين في الوقت نفسه ١٩٢٤-١٩٢٥، مثل كل الإثارة التي كانت حول موجات دي برويل، وظاهرة كومبتون، والحركة المغزلية للإلكترون (سبين)، وهي آخر الإسهامات العظمى لأينشتاين في نظرية الكم (في الواقع آخر قطعة عظيمة من البحث العلمي لأينشتاين)، وهي تمثل في الوقت نفسه القطيعة الكاملة مع الأفكار الكلاسيكية.

ولد ساتيندرا بوز Satyendra Bose في كلكتا سنة ١٨٩٤، وعين قائدًا Reader في الفيزياء سنة ١٩٢٤ في جامعة دكا الجديدة، وقد تتبع أعمال بلانك وأينشتاين وبور وسومرفيلد عن بعد، وكان مدركًا لعدم كفاية قواعد قانون بلانك، لذا فقد بدأ في استنباط قانون الجسم الأسود بطريقة جديدة، بادئًا بافتراض أن الضوء يجيء على شكل فوتونات، كما تدعى اليوم، وقد توصل إلى استنباط بسيط جدًّا لقانون يتضمن جسيمات بلا كتلة تخضع لنوع خاص من الإحصاء، وقام بإرسال نسخة من هذا البحث بالإنجليزية إلى أينشتاين وطلب فيه أن يقدمها للنشر في Zeitschrift Für Physik مجلة الفيزياء. تأثر أينشتاين كثيرًا بهذا البحث لدرجة أنه ترجمه إلى الألمانية بنفسه وقدمه شخصيًا مشفوعًا بتوجيه قوي منه للنشر، وقد نشر بالفعل في عدد أغسطس ١٩٢٤. وعندما قام بوز بإزاحة كل عناصر النظرية الكلاسيكية واستنبط قانون بلانك من تضافر كوانتا الضوء — معتبرًا إياها جسيمات نسبية ذات كتلة تساوى الصفر — مع الطرق الإحصائية، فإنه يكون قد قطع في النهاية نظرية الكم عن سالفتها الكلاسيكية وحررها تماما. ومنذ الآن يمكن التعامل مع الإشعاع على أنه غاز كمي Quantum gas، والإحصاء المستخدمة تتعامل مع أعداد الجسيمات وليس تردد الموجات.

طور أينشتاين هذا الإحصاء أبعد من ذلك، وطبقه على الحالة الافتراضية لتجمع الذرات — غاز أو سائل — التي تخضع للقواعد نفسها، وقد اتضح أن هذه الإحصاء لا يلائم الغازات الحقيقية في درجة حرارة الغرفة، ولكنه

صالح تمامًا للتعامل مع الخصائص الشاذة للمائع الفائق Superfluid للهليوم، وهو سائل مبرد إلى قرب الصفر المطل -٢٧٣ درجة سيلزيوس ومع ظهور إحصاء فيرمي-ديراك على مسرح الأحداث سنة ١٩٢٦ استغرق الأمر بعض الوقت من الفيزيائيين ليتعرفوا على أي القواعد يمكن تطبيقها في أي حالة، وليقدروا مغزى الحركة المغزلية ذات نصف العدد الصحيح.

ولا يَعنينا الآن الحذق والمهارة، ولكن من المهم التمييز بين الفيرميونات والبوزونات بطريقة يسهل فهمها، لقد ذهبت لمشاهدة مسرحية بطولة الكوميدي سبايك ميليجان Spike Milligan منذ عدة سنوات، وقبل رفع الستار مباشرة ظهر هذا الرجل العظيم بنفسه على خشبة المسرح، وألقى نظرة شاحبة على حفنة المقاعد الخالية في أعلى جزء من صالة العرض بالقرب من خشبة المسرح. وقال: «لن يجدوا أبدًا أي أحد يشتري هذه التذاكر الآن.» وأضاف «يمكنكم جميعًا أن تتحركوا لتشغلوا هذه المقاعد حتى أتمكن من رؤيتكم.» نفذت القاعة ما اقترحه عليها، وتحرك كل واحد إلى الأمام لتمتلئ المقاعد الخالية في نهاية صالة العرض. لقد كان سلوكنا هذا تمامًا مثل سلوك الفيرميونات الطيبة حسنة السلوك، كان كل فرد يشغل مجرد مقعد واحد (حالة كمية واحدة) وبذلك تُشغل المقاعد بدءًا من أفضل المقاعد «الحالة الأرضية» بجوار خشبة المسرح ثم إلى الخارج.

وعلى عكس ما حدث في القاعة، ما جرى في إحدى حفلات الموسيقى لبروس سبرنجستين Bruce Springsteen كانت جميع المقاعد مشغولة إلا أنه كان هناك فرجة صغيرة بين الصف الأول من المقاعد وخشبة المسرح، وعندما أطفئت أضواء المسرح وبدأت الفرقة تعزف بداية مقطوعة «ولد ليجري» Born to Run اندفع الجميع من مقاعدهم وانحشروا أمام خشبة المسرح، انحشرت إذن كل «الجسيمات» في «حالة الطاقة» نفسها دون تمييز، وهذا هو الفرق بين الفيرميونات والبوزونات؛ فالفيرميونات تخضع لمبدأ الاستثناء، أما البوزونات فلا تخضع له.

وجميع الجسيمات «المادية» التي تعودنا عليها — الإلكترونات والبروتونات — هي فيرميونات، وبدون مبدأ الاستثناء، لن توجد مختلف

العناصر الكيميائية ولا كل السمات التي تصنع عالمنا الفيزيائي. أما البوزونات فهي جسيمات أشباح، مثل الفوتونات، وما قانون الجسم الأسود إلا نتيجة لتدافع جميع الفوتونات لتشغل حالة الطاقة نفسها. وقد تحاكي ذرات الهليوم خصائص البوزونات تحت الظروف المناسبة، وتصبح مائعًا فائقًا لأن كل ذرة من ^{4}He تحتوي على بروتونين ونيوترونين بحركاتها المغزلية أنصاف الأعداد الصحيحة التي تترتب لتعطي الصفر، وتخضع الفيرميونات لقانون الحفاظ فتظل أعدادها ثابتة في التفاعلات التداخلية بين الجسيمات؛ فلا يمكن زيادة العدد الكلي للإلكترونات في الكون، ويمكن إنتاج البوزونات بأعداد هائلة، وهي حقيقة معروفة لأي شخص يشعل الضوء.

أين الآتي؟

ومع أن كل شيء يبدو منطقيًّا وصافيًا وملائمًا من منظور ثمانينيات القرن العشرين، إلا أنه سنة ١٩٢٥ كانت النظرية الكمية مجرد فوضى. لم يكن هناك طريقًا معبدًا للتقدم، بل بالأحرى كان أفراد عديدون يحاول كل واحد منهم شق طريق منفصل خلال الأدغال. كان الباحثون على القمة فقط يعرفون ذلك جيدًا، وعبروا عن قلقهم علانية، إلا أن الوثبة العظمى إلى الأمام كانت ستأتي بعد ذلك، فيما عدا استثناءً واحدًا، من الجيل الجديد الذي دخل عالم البحث العلمي بعد الحرب العالمية الأولى، وربما نتيجة لذلك كانوا جاهزين للأفكار الجديدة. وقد علق ماكس بورن سنة ١٩٢٤ قائلًا: «في اللحظة الحالية لا يملك المرء إلا عددًا قليلًا من الإيماءات (اللمحات).» وذلك في حديثة حول الطريقة التي تحتاج إليها القوانين الكلاسيكية لتعديلها حتى تفسر الخصائص الذرية، وفي كتابه عن النظرية الذرية والمنشور سنة ١٩٢٥ وعد بإصدار جزء ثان لتكتمل المهمة، وهو الجزء الذي كان يظن أنه سيظل لم ينجز لعدة سنوات.*

* الاقتباسات في هذا المقطع مأخوذ من خاتمة الجزء الأول من كاتب ميهرا وريتشنبرج.

وبعد محاولة فاشلة من هايزنبرج لحساب بنية ذرة الهليوم، كتب معلقًا على ذلك لباولي «ياللتعاسة» وهي العبارة التي كررها باولي في خطابه لسومرفيلد في يوليو/تموز من العام نفسه، قائلًا: «النظرية ... بالنسبة للذرات التي لها أكثر من إلكترون، مجرد تعاسة عظمى.» وقد كتب باولي لكونيج في مايو/أيار ١٩٢٥ قائلًا: «الفيزياء في هذه اللحظة صارت مرة أخرى مشوشة.» وبحلول عام ١٩٢٥ كان بور نفسه مكتئبًا مثلهم حول المشاكل العديدة التي أزعجت نموذجه للذرة. وفي يونيو/حزيران ١٩٢٦ كتب ويلهلم فاين Wilhelm Wien — الذي كان قانونه للجسم الأسود بمنزلة إحدى منصات القفز للوثبة التي قام بها بلانك في الظلام — إلى شرودنجر عن «شرك الأعداد الصحيحة وأنصاف الأعداد الصحيحة في الانقطاعات الكمية والاستخدام العشوائي للنظرية الكلاسيكية»، كانت كل الأسماء الكبرى في نظرية الكم على دراية بالمشاكل — وكانوا جميعًا على قيد الحياة سنة ١٩٢٥ باستثناء أحدهم (هو هنري بوانكريه Henri Poincaré، أما لورنس Lorentz وبلانك، وج. ج. طومسون، وبور، وأينشتاين، وبورن، فكانوا لا يزالون أشداء أما باولي وهايزنبرج وديراك وآخرون فقد بدءوا يصنعون ماركتهم). وسنة ١٩٢٥ كانت الشخصيتان العظيمتان أينشتاين وبور قد بدآ يختلفان بوضوح في وجهتي نظرهما؛ أولًا كان بور من أقوى المعارضين لكوانتم الضوء، ثم عندما بدأ أينشتاين يهتم بدور الاحتمال في نظرية الكم أصبح بور بطلها الأكبر. صارت الطرق الإحصائية (للسخرية أدخلها أينشتاين) هي حجر الزاوية في نظرية الكم، إلا أن أينشتاين كتب لبورن مبكرًا سنة ١٩٢٠: «الموضوع المتعلق بالنسبية يسبب لى الكثير من المتاعب، أيضًا ... لا بد أن أقبل ذلك ... أنا أفتقر إلى شجاعة الإيمان الراسخ.» وقد استمر الحوار والجدل بين أينشتاين وبور حول هذا الموضوع على مدى خمس وثلاثين سنة، حتى وفاة أينشتاين.*

* عبر أينشتاين عن هذه الشكوك كذلك في مراسلاته مع بورن والمنشورة في «خطابات بورن-أينشتاين» والاقتباس الوارد هنا من صفحة ٢٣ من طبعة ماكميلان.

ويصف ماكس جامير Max Jammer الوضع في بداية سنة ١٩٢٥ بأنه «خليط يبعث على الأسى من افتراضات ومبادئ ونظريات ووصفات حسابية»* ولا بد من حل كل مشكلة في فيزياء الكم أولًا باستخدام الفيزياء الكلاسيكية، ثم بعد ذلك يجري التعامل معها (إعادة صياغتها) بإدخال الأعداد الكمية بحكمة، متحمسين بالتخمين أكثر من المنطق البارد. لم تكن نظرية الكم مستقلة ذاتيًا، ولا منطقية بذاتها، لكنها وجدت متطفلة على الفيزياء الكلاسيكية مثل نبته عجيبة بلا جذور. ولا عجب أن بورن كان يعتقد أنه لا بد من مرور سنوات قبل أن يتمكن من كتابة الجزء الثاني المحدد في الفيزياء الذرية. ويبدو أن الغرابة في رواية الكم لا تزال مستمرة؛ فبعد بضعة أشهر من أيام اللبس في بداية سنة ١٩٢٥، لم تظهر نظرية واحدة للكم أذهلت المجتمع العلمي بل نظريتان كاملتان مستقلتان ومنطقيتان.

* التطور المفهومي لميكانيكا الكم، صفحة ١٩٦.

الفصل السادس

المصفوفات والموجات

ولد فيرنر هايزنبرج في فورتسبرج Würzburg في ٥ ديسمبر/كانون الأول سنة ١٩٠١ وسنة ١٩٢٠ التحق بجامعة ميونيخ حيث درس الفيزياء تحت إشراف آرنولد سومرفيلدِ Arnold Sommerfeld، أحد رواد الفيزياء في ذلك الوقت، الذي كان مشاركًا عن قرب في تطوير نموذج بور للذرة. انغمس هايزنبرج مباشرة في أبحاث نظرية الكم، ووضع أمام عينيه مهمة اكتشاف أعداد كمية تستطيع تفسير بعض الانشطارات في خطوط الطيف إلى أزواج أو ثنائيات. وقد وقع على الإجابة في غضون أسبوعين، من الممكن تفسير كل النسق بمعلومية أعداد كمية أنصاف أعداد صحيحة؛ لقد اكتشف هذا الطالب الشاب البريء أبسط الحلول للمشكلة، إلا أن زملاءه والمشرف سومرفيلد ارتعبوا، أما سومرفيلد الذي كان غارقًا في نموذج بور، فقد كانت الأعداد الكمية الصحيحة عنده عقيدة مستقرة، ولذا فإن تخمينات الطالب الشاب قد استبعدت في الحال، وكان سبب انتشار التخوف بين الخبراء هو أن إقحام أنصاف الأعداد الصحيحة في المعادلات قد يفتح الباب لتدخل الأرباع والأثمان والأجزاء من الستة عشر، الأمر الذي قد يقضي على القواعد الأساسية لنظرية الكم، لكنهم كانوا على خطأ.

وخلال بضعة أشهر، توصل الفيزيائي الأكبر سنًّا والأقدم، ألفريد لانديه Alfred Landé لنفس الفكرة ونشرها، وقد اتضح فيما بعد أن الأعداد الكمية أنصاف الأعداد الصحيحة ذات أهمية محورية في نظرية الكم الكاملة، وتلعب دورًا حاسمًا في وصف خاصية السبين للإلكترون؛ تخضع الأجسام التي لها

سبين قيمته عدد صحيح أو صفر، مثل الفوتونات، لإحصاء بوز-أينشتاين، وتخضع الأجسام التي لها سبين أنصاف أعداد صحيحة (١/٢، أو ٣/٢، وهكذا) لإحصاء فيرمي-ديراك. ويرتبط رقم سبين أنصاف الأعداد الصحيحة للإلكترون مباشرة ببنية الذرة والجدول الدوري للعناصر. ولا يزال تغير الأعداد الكمية يحدث بأعداد صحيحة، والقفز من ١/٢ إلى ٣/٢ أو من ٥/٢ إلى ٩/٢ قانوني تمامًا مثل الانتقال من ١ إلى ٢ أو من ٧ إلى ١٢. وهكذا ضاعت الفرصة على هايزنبرج في الحصول على شرف إدخال فكرة جديدة في نظرية الكم، لكن العبرة هنا هي أنه كما حدث في الماضي أن قام الشباب في الجيل السابق بتطوير أولى نظرية للكم، فقد قامت العقول الشابة غير المثقلة بالأفكار «التي يعرفها الجميع» مرة أخرى بالخطوة التالية. وقد صحح هايزنبرج بالتأكيد من الوضع الناشئ عن ضياع شرف كونه الأول في أحد الاكتشافات العلمية الصغيرة، وذلك بأبحاثه في السنوات القليلة التالية.

وبعد فصل دراسي في جوتنجن تحت إشراف بورن حيث شهد مهرجان بور الشهير، عاد هايزنبرج إلى ميونيخ وأكمل دراسته للدكتوراه سنة ١٩٢٣، ولم يكن قد بلغ الثانية والعشرين من عمره. وفي ذلك الوقت كان وولفجانج باولي، الصديق المقرب لهايزنبرج، الذي نضج مبكرًا مثل صديقه والطالب السابق لسومرفيلد، كان قد انتقل لتوه من العمل مساعدًا لبورن في جوتنجن لفترة محدودة، وشغل هايزنبرج مكانه سنة ١٩٢٤، وقد منحته الوظيفة الفرصة للعمل عدة أشهر مع بور في كوبنهاجن. وبحلول عام ١٩٢٥ كان هذا الرياضي الفيزيائي مبكر النضج قد تزود بصورة أفضل من أي شخص آخر بالأدوات التي تؤهله لاكتشاف نظرية الكم المنطقية التي كان يتوقع اكتشافها كل فيزيائي في النهاية، إلا أن أحدًا لم يتوقع اكتشافها بهذه السرعة.

قام الاكتشاف المفاجئ لهايزنبرج على أساس فكرة كان قد التقطها من مجموعة جوتنجن — ولا يعرف أحد اليوم من هو أول من اقترح هذه الفكرة — وهي أن الفيزياء لا بد أن يقصر اهتمامها فقط على الأشياء التي يمكن مشاهدتها فعليًّا بالتجربة. ويبدو ذلك مبتذلًا لكنه في الواقع

بصيرة عميقة جدًّا؛ فالتجربة التي «تشاهد» الإلكترونات في الذرة، مثلًا، لا تظهر لنا صورة الكُرات الصغيرة الصلبة التي تدور حول النواة — ولا توجد طريقة لمشاهدة «المدار» — وتنبئنا الشواهد من خطوط الطيف عما يحدث للإلكترونات عندما تنتقل من أحد مستويات الطاقة (أو أحد المدارات بلغة بور) إلى مستوى آخر. ويتعلق كل ما يمكن مشاهدته من سمات الإلكترونات والذرات «بحالتين»، أما مفهوم المدار فهو شيء قد أضيف إلى المشاهدات في تشبيهه بالطريقة التي تتحرك بها الأشياء في عالمنا اليومي (ولنتذكر slithy toves الزلقة). وقد جرد هايزبنرج ونحى جانبًا فوضى التشبيه من الحياة اليومية وعمل جاهدًا على الرياضيات التي تصف ترافق «أزواج» الحالات وليس «حالة» واحدة للذرة أو الإلكترون.

الاكتشاف المفاجئ في هيليجولاند

عادة ما تروى قصة نوبة حمى القش التي أصابت هايزنبرج سنة ١٩٢٥، وكيف سافر ليتعافى منها فوق الجزيرة الصخرية هيليجولاند Heligoland، حيث أخذ يكد ويجتهد في التعامل مع مهمة تفسير ما هو معروف عن السلوك الكمي في هذه المدة المحدودة، تمكن هايزنبرج من العمل بشدة على هذه المشكلة بعد أن ذهبت عنه الحمى ولم يكن هناك ما يلهيه على الجزيرة، فقد وصف مشاعره عندما بدأت الأعداد تتساقط في أماكنها، وذلك في سيرته الذاتية «الفيزياء وما وراءها»، وقد وصف كذلك كيف أنه في الثالثة صباحًا لم يعد يشك في «تماسك وثبات نوع ميكانيكا الكم التي كانت تشير ناحيتها حساباتي، وفي البداية كنت مستثارًا بشدة، وكان لدي شعور بأنني أشاهد من خلال سطح الظواهر الذرية عالمًا داخليًّا جميل الشكل غريبًا، وقد أصبت بدوار تقريبًا عندما فكرت أن عليّ الآن أن أقوم بسبر هذه الثروة من البنى الرياضية التي نشرتها الطبيعة أمامي بكرم بالغ».

ولدى عودة هايزنبرج إلى جوتنجن، أنفق ثلاثة أسابيع في إعداد بحثه في صورة مناسبة للنشر وأرسل نسخة من المقال أولًا إلى صديقه القديم

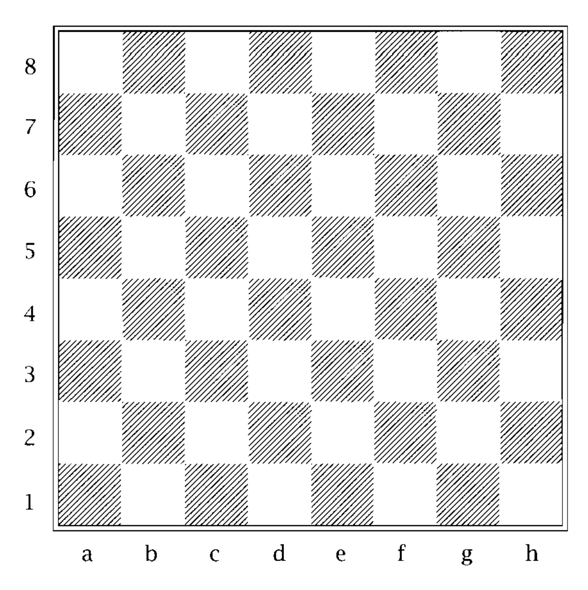
باولي، وطلب منه أن يعرف هل للبحث مغزى. كان باولي متحمسًا، إلا أن هايزنبرج كان منهكًا من جراء الجهد الذي بذله كما لم يكن متأكدًا بعد من أن البحث جاهز للنشر. ترك المقال لبورن ليتصرف فيه بما يراه مناسبًا، وغادر في يوليو/تموز سنة ١٩٢٥ ليعطي سلسلة من المحاضرات في ليدن وكمبريدج، ومن سخرية الأقدار أن اختار هايزنبرج ألا يتناول أبحاثه الجديدة في محاضراته هناك، وكان على المستمعين أن ينتظروا حتى تصلهم الأخبار عن طريق قنوات أخرى.

كان بورن سعيدًا بإرسال مقال هايزنبرج إلى مجلة الفيزياء وأدرك لحظتها تقريبًا ما الذي وقع عليه هايزنبرج صدفة؛ فليس من الممكن التعامل مع الرياضيات المتضمنة حالتين لذرة واحدة بواسطة الأعداد العادية لكنها تضمنت مجموعات مرتبة من الأعداد — التي فكر فيها هايزنبرج — في جداول، وأفضل تشبيه لها هي رقعة الشطرنج؛ فهناك ٦٤ مربعًا على الرقعة، وفي هذه الحالة من الممكن تعريف كل مربع بواسطة عدد يقع في المدى من ١ إلى ٦٤، ومع ذلك، فإن لاعبي الشطرنج يفضلون استخدام مجموعة رموز ترقم «أعمدة» المربعات على الرقعة بواسطة الحروف (a, b, c, d, e, f, g, h) وترقم «الصفوف» من أسفل إلى أعلى (1, 2,3, 4, 5, 6, 7, 8). والآن، فإن كل مربع على الرقعة يمكن تعريفه بواسطة زوج فريد من الترقيم التعريفي: a1 هو المربع الخاص بالطابية (الرخ)، وg2 هو المربع الخاص ببيدق الفرس، وهكذا. وتتضمن جداول هايزنبرج مجموعات مرتبة من الأعداد في بعدين، مثل رقعة الشطرنج، لأنه كان يجري حساباته المتضمنة لحالتين وتداخلاتهما، وقد تضمنت تلك الحسابات — ضمن أشياء أخرى — ضرب فئتين من مثل هذه الفئات من الأعداد، أو مجموعتين مرتبتين من الأعداد معًا، وقد قام هايزنبرج بالعمل جاهدًا حتى توصل إلى الحيل الرياضية الصحيحة لتقوم بالمهمة، لكنه قد انتهى إلى نتيجة غاية في الغرابة، ومربكة لدرجة أنها كانت أحد أسباب حيائه وعدم ثقته بنشر حساباته؛ فلدى ضرب هذه المجموعات المرتبطة معًا اتضح أن «الناتج» الذي تحصل عليه يعتمد على الترتيب الذي أجريت به عملية الضرب.

وهذا الأمر غريب حقًا، وهو مثل القول إن ٢ × ٣ ليست هي ٣ × ٢ أو بمصطلحات الجبر $a \times b$ لا تساوي $b \times a$. كان بورن مهمومًا بهذه الغرابة ليل نهار، مقتنعًا أن شيئًا ما أساسيًا يقبع وراءها، ثم فجأة رأي النور، فقد كانت المجموعات المرتبة من الأعداد الرياضية وجداول الأعداد التي صممها هايزنبرج بجهد لا يكل، معروفة بالفعل في الرياضيات، فقد كان حساب تغاير (تفاضل وتكامل) كامل لمثل هذه الأعداد موجودًا بالفعل، وكانت تسمى مصفوفات، وقد درسها بورن في السنوات الأولى من القرن العشرين عندما كان طالبًا في بريسلاو، ولم يكن الأمر مفاجأة أن يتذكر هذا الفرع الباهت من الرياضيات بعد أكثر من عشرين سنة، لأن هناك خاصية أساسية للمصفوفات كانت دائمًا لها تأثير عميق على الطلاب عندما يدرسونها لأول مرة: تعتمد الإجابة التي تحصل عليها عندما تضرب المصفوفات على الترتيب الذي أجريت به الضرب، أو بلغة الرياضة، المصفوفات لا تقبل التبديل Commute.

الرياضة الكمية

قام بورن بتطوير بدايات ما يعرف إلى الآن باسم ميكانيكا المصفوفات، وذلك في صيف ١٩٢٥ عندما كان يعمل مع باسكال جوردان Pascual Jordan، وعندما عاد هايزنبرج إلى كوبنهاجن في شهر سبتمبر/أيلول انضم إليهما عن طريق المراسلات في كتابة مقال علمي عن ميكانيكا الكم، وقد أكد المؤلفون الثلاثة في هذا المقال على الأهمية الرئيسية لخاصية عدم التبادل في المتغيرات الكمية، بصورة أكثر وضوحًا وصراحة من المقال الأصلي الذي كتبه هايزنبرج. وكان بورن قد اكتشف بالفعل في مقال مشترك مع جوردان، العلاقة $pq - qp = \hbar/i$، حيث q، p مصفوفات تمثل المتغيرات الكمية المكافئة في عالم الكوانتم للزخم والموقع. ويظهر ثابت بلانك في المعادلة الجديدة مع i الجذر التربيعي لسالب واحد (-1) وذلك في ما أصبح يعرف بـ«مقال الرجال الثلاثة» Three-man paper، وقد أكد فريق جوتنجن على



شكل ٦-١: يمكن تعريف كل مربع على رقعة الشطرنج بزوج من عدد وحرف مثل b4 أو f7 كذلك حالات ميكانيكا الكم يمكن تعريفها بزوج من الأعداد.

أن هذه هي «العلاقة الأساسية في ميكانيكا الكم» لكن ما الذي تعنيه في مصطلحات الفيزياء؟ كان ثابت بلانك قد أصبح مألوفًا بما فيه الكفاية في ذلك الوقت، وعرف الفيزيائيون معادلات تتضمن i (مفتاح حل اللغز الذي سيظهر — إذا تحققوا منه — حيث تتضمن مثل هذه المعادلات عمومًا تذبذبات أو موجات) إلا أن المصفوفات لم تكن مألوفة بالمرة لمعظم الرياضيين والفيزيائيين سنة ١٩٢٥ وقد بدت لهم خاصية عدم التبادل غريبة مثل غرابة ثابت بلانك h التي بدت لأسلافهم لأول وهلة سنة ١٩٠٠، وقد جاءت النتائج دراماتيكية لهؤلاء الذين يجيدون الرياضيات. وقد حلت معادلات مشابهة متضمنة المصفوفات محل معادلات ميكانيكا نيوتن، وقال هايزنبرج: «كانت خبرة غريبة أن تكتشف أن العديد من النتائج القديمة لميكانيكا نيوتن، مثل الحفاظ على الطاقة ... إلخ، يمكن استنباطها كذلك في

-2	-3	-4	-5	-6	-4	-3	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	3	4	5	6	4	3	2

شكل ٦-٢: تتحدد «حالة» كل مربع على رقعة الشطرنج بواسطة قطعة الشطرنج التي تشغله، وفي هذه الطريقة يعرف البيدق بالعدد 1 والطابية (الرخ) بالعدد 2 وهكذا، وتحمل القطع البيضاء أعدادًا موجبة وتحمل السوداء أعدادًا سالبة. ومن الممكن وصف التغير في حالة الرقعة كلها بواسطة تعبير مثل «البيدق إلى الوزير أربعة»، أو بواسطة الرموز الجبرية e2-e4. وتوصف الانتقالات الكمية بمجموعة من الرموز المماثلة تربط أزواج الحالات (الأولية والنهائية)، وليس لنا علم في كلا الحالتين بأي شكل عن الكيفية التي جرت بها عملية الانتقال من حالة إلى أخرى، وهي النقطة التي تظهر بقوة من حركة الفرس والبيات. وفي مجال التشبيه بالشطرنج يمكننا تخيل أصغر التغيرات الممكنة على الرقعة، e2-e3 على أنها تقابل إضافة كوانتم من الطاقة $h\nu$، و«الانتقال» e3-e2 سيقابل عندئذ تحرر أو إطلاق نفس الكوانتم من الطاقة. وليس التشبيه دقيقًا، ولكنه يلقي الضوء على الطريقة التي تصف بها مختلف الرموز الحدث نفسه. وقد اكتشف كل من هايزنبرج وديراك وشرود نجر، بالطريقة نفسها، أشكالًا مختلفة من الرموز الرياضية لتصف الأحداث الكمية نفسها.

مخطط جديد.»* وبعبارة أخرى «تضمنت» ميكانيكا المصفوفات ميكانيكا نيوتن في نفسها، تمامًا مثلما تضمنت معادلات أينشتاين النسبية معادلات نيوتن كحالة خاصة. وللأسف، لم يفهم هذه الرياضيات إلا عدد قليل من الناس، ولم يعترف بها معظم الفيزيائيين في الحال، لأنها اكتشاف مفاجئ مدلوله عظيم قام به هايزنبرج وفريق جوتنجن، لكن كان هناك استثناء وحيد في كمبريدج بإنجلترا.

كان بول ديراك Paul Dirac يصغر هايزنبرج ببضعة أشهر فقط، فقد ولد في ٨ أغسطس/آب سنة ١٩٠٢، ويعد ديراك العالم النظري الإنجليزي الوحيد الذي يمكن أن يوضع في صف نيوتن؛ فقد طور أكثر الصور اكتمالًا لما يعرف اليوم بميكانيكا الكم، ومع ذلك فهو لم يتجه نحو الفيزياء النظرية إلا بعد تخرجه في جامعة بريستول سنة ١٩٢١ مهندسًا، ولما لم يجد وظيفة مهندس، وأتيحت له فرصة دراسة الرياضيات في كمبريدج، لكنه لم يقبلها نظرًا لحاجته إلى المال، وأثناء إقامته في بريستول مع والديه التحق بمنهج في الرياضيات مدته ثلاث سنوات أنهاه في عامين فقط بسبب دراسته للهندسة، وقد تمكن من استكمال درجة BA في الرياضيات التطبيقية سنة ١٩٢٣، ووقتها استطاع في نهاية الأمر الذهاب إلى كمبريدج للقيام بأبحاث مدعمة بمنحة من قسم الأبحاث العلمية والتطبيقية، ولم يعلم بنظرية الكم لأول مرة إلا عندما وصل إلى كمبريدج.

وهكذا كان ديراك طالب أبحاث غير معروف وغير ذي خبرة عندما استمع لمحاضرة هايزنبرج في كمبريدج في يوليو/تموز ١٩٢٥، ومع أن هايزنبرج لم يتحدث علنًا عن بحثه الجديد حينئذ، فإنه أشار إليه في حديثة مع رالف فولر Ralph Fowler، المشرف على ديراك، ونتيجة لذلك أرسل إلى فولر نسخة من صورة البحث في منتصف أغسطس/آب قبل ظهوره في مجلة الفيزياء. أعطى فولر البحث لديراك الذي اطلع عليه قبل أي شخص آخر من خارج جوتنجن (ماعدا صديق هايزنبرج باولي)، فأصبح لديه الفرصة

* الفيزياء والفلسفة (Physics and Philosophy) صفحة ٤١.

لدراسة النظرية الجديدة. وفي هذا المقال الأول، ومع أن هايزنبرج قد أشار إلى خاصية عدم التبادل في متغيرات ميكانيكا الكم — المصفوفات — فإنه لم يطور الفكرة، لكنه حاول السير ببطء وحذر حولها. وعندما أحكم ديراك قبضته على المعادلات، أدرك في الحال الأهمية الأساسية للحقيقة البسيطة $a \times b$ لا تساوي $b \times a$. وعلى عكس هايزنبرج، كان ديراك يعلم بالفعل كميات رياضية لها السلوك نفسه، وفي غضون بضعة أسابيع كان في مقدوره إعادة معالجة معادلات هايزنبرج بمصطلحات فرع من الرياضيات كان قد طوره وليم هاملتون William Hamilton منذ قرن من الزمن، وفي واحدة من أظرف المُفارقات العلمية، أثبتت معادلات هاملتون أنها مفيدة في نظرية الكم الجديدة، التي وضعت الأمور في نصابها لمدارات الإلكترونات، وقد تطورت في القرن التاسع عشر أساسًا لتساعد في حسابات مدارات الأجسام في منظومة مثل المجموعة الشمسية، حيث يتداخل عدد من الكواكب مع بعضها.

وهكذا اكتشف ديراك — مستقلًّا عن مجموعة جوتنجن — أن معادلات ميكانيكا الكم لها البنية الرياضية نفسها التي لمعادلات الميكانيكا الكلاسيكية، وأن الميكانيكا الكلاسيكية مضمنة في ميكانيكا الكم كحالة خاصة تقابل أعدادًا كمية كبيرة أو تفترض أن ثابت بلانك يساوي الصفر. قام ديراك بتطوير طريقة أخرى للتعبير رياضيًّا عن الديناميكيات متبعًا اتجاهه الخاص باستخدام صورة خاصة من الجبر، أطلق عليها الجبر الكمي Quantum Algebra متضمنًا عمليات جمع وضرب المتغيرات الكمية، أو «أعداد q»، وأعداد q هذه غريبة بهيمية الطبيعة، ليس على الأقل لأنه في عالم الرياضيات الذي طوره ديراك من المستحيل القول أي العددين a أو b أكبر، ولا مكان في هذا الجبر لمفهوم عدد أكبر أو أصغر من عدد آخر، لكن مرة أخرى تناسبت قواعد هذه المنظومة الرياضية بالضبط مع مشاهدات سلوك العمليات الذرية. وفي الحقيقة من الصواب القول إن الجبر الكمي يتضمن ميكانيكا المصفوفات في داخله، غير أنه يقوم بما هو أكثر من ذلك كثيرًا.

رحب فولر في لحظتها بأهمية بحث ديراك، وبناء على تحريضه نُشر البحث في أعمال الجمعية الملكية Proceedings of the Royal Society في ديسمبر/كانون الأول ١٩٢٥. وقد تضمن المقال — ضمن أشياء أخرى، كمُكون أساسي في النظرية الجديدة — أعداد الكم نصف الأعداد الصحيحة التي أزعجت هايزنبرج بضع سنوات قبل ذلك. أرسل هايزنبرج نسخة من مخطوطة المقال الذي كتبه ديراك وكان سخيًّا في مديحه: «لقد قرأت مقالك غير العادي في جماله عن ميكانيكا الكم بأكبر اهتمام، ولا يمكن أن يكون هناك شك في صحة كل نتائج ... (والمقال) مكتوب أفضل وأكثر تركيزًا من محاولاتنا هنا.»* وفي النصف الأول من سنة ١٩٢٦ استأنف ديراك البحث في سلسلة من أربع مقالات حاسمة ودقيقة، كونت كلها رسالته التي منح على أساسها درجة الدكتوراه. وأثناء كل ذلك استخدم باولي طرقًا للمصفوفات للتنبؤ بالضبط بسلسلة بالمر لذرة الهيدروجين، وبحلول نهاية سنة ١٩٢٥ أصبح واضحًا أن انشطار بعض خطوط الطيف إلى ثنائيات يمكن تفسيرها في الحقيقة بواسطة خلع صفة جديدة تسمى سبين على الإلكترون، وقد واءمت القطع بعضها بعضًا جيدًا بواقعية، أما الأدوات الرياضية المختلفة التي استخدمها أنصار ميكانيكا المصفوفات المختلفون فقد كانت مجرد سمات مختلفة للواقع نفسه.†

ومرة أخرى يمكن أن تساعد لعبة الشطرنج في إيضاح ذلك؛ فهناك عدة طرق مختلفة تصف مباراة في الشطرنج على الورق المطبوع. وفي إحدى هذه الطرق يطبع شكل يمثل رقعة الشطرنج مع توضيح مواقع كل القطع، لكن ذلك سيشغل حيزًا كبيرًا «إذا أردنا وصف مباراة كاملة». وفي طريقة أخرى تُسمى القطع التي تتحرك: «بيدق الملك إلى بيدق الملك أربعة.» وفي أكثر الطرق الجبرية اختصارًا رمزيًّا تصبح الحركة نفسها ببساطة «d2-d4»

* مقتبسة من ميهرا وريتشنبرج، الجزء الرابع صفحة ١٥٩.

† في نسخة ديراك من ميكانيكا الكم، جرى إحلال التعبير الخاص من ميكانيكا الكم $(ab-ba)/i\hbar$ محل التعبير الخاص من معادلات هامليتون، وهي مجرد صورة أخرى لتعبير بورن وهايزنبرج وجوردان المسمى «العلاقة الكمية-الميكانيكية الأساسية» Fundamental quautum-mechanical relation، في مقال الرجال الثلاثة والمكتوب قبل ظهور مقال ديراك الأول عن ميكانيكا الكم، إلا أنه نشر بعد مقال ديراك.

ثلاث طرق للوصف مختلفة تعطينا المعلومات نفسها عن حدث حقيقي، انتقال بيدق من حالة إلى أخرى (وتمامًا كما في عالم الكم، فنحن لا نعرف شيئًا عن الكيفية التي انتقل بها البيدق من حالة إلى أخرى، وهي النقطة التي تصبح أكثر وضوحًا إذا أخذنا في اعتبارنا حركة حصان الشطرنج). ويشبه ذلك الصياغات المختلفة لميكانيكا الكم. ويُعتبر الجبر الكمي لديراك الأكثر أناقة وجمالًا في المعنى الرياضي، أما طريقة المصفوفات التي طورها بورن ومعاونوه في أثر هايزنبرج فهي خرقاء وأقل ملاءمة، لكنها مع ذلك فعالة.*

وقد جاءت بعض أكثر النتائج المبكرة دراماتيكية عندما حاول ديراك تضمين النسبية الخاصة في ميكانيكا الكم الخاصة به. سعد ديراك كثيرًا بفكرة أن الضوء جسيمات (فوتونات) وابتهج باكتشاف أن إدخال الزمن في صورة العدد q مع باقي الأعداد في معادلاته، أدى إلى حتمية التنبؤ بأن الذرة لا بد أن ترتد (تتراجع) عندما تشع الضوء، وهو ما لا بد أن تفعله إذا كان الضوء على شكل جسيمات لها الزخم الخاص بها، واستمر ديراك في تطوير تفسير لظاهرة كومبتون من ميكانيكا الكم. انقسمت حسابات ديراك إلى قسمين: الأول هو معالجة بارعة بالأرقام تضمنت أعداد q، أما الثاني فهو تفسير المعادلات بمصطلحات ما يمكن مشاهدته فيزيائيًّا. وتتواءم هذه العملية تمامًا مع ما يبدو أن الطبيعة «تُجري به حساباتها» ثم تقدم لنا الحدث الذي يمكن مشاهدته فيزيائيًّا — مثل انتقال الإلكترون — لكن لسوء الحظ، وبدلًا من تتبع هذه الفكرة للنهاية في السنوات التي تلت ١٩٢٦، خُدع الفيزيائيون وابتعدوا عن الجبر الكمي بواسطة اكتشاف جديد آخر

* وصف ديراك بتواضع وبساطة أصيلة ومميزة له كيف كان الأمر سهلًا في إحراز التقدم بمجرد أن عرف أن معادلات الكم الصحيحة هي ببساطة المعادلات الكلاسيكية موضوعة في صورة هاميلتونية Hamiltonian وكان كل ما تطلبته الألغاز الصغيرة التي اكتنفت نظرية الكم، هو صياغة المعادلات الكلاسيكية المكافئة، ثم تحويلها إلى هاملتونية، ثم حل اللغز بعد ذلك: «لقد كانت مباراة في غاية الإثارة يمكن للمرء أن يلعبها. وكلما حل أحد مشكلة صغيرة أمكنه كتابة مقال علمي عنها. لقد كان من السهل جدًا في تلك الأيام أن يقوم فيزيائي من الدرجة الثانية ببحث من الدرجة الأولى. ولم يتكرر هذا الزمن المتألق منذ ذلك الحين. واليوم من الصعب جدًّا على فيزيائي من الدرجة الأولى القيام ببحث من الدرجة الثانية.» اتجاهات الفيزياء ص٧ (Directions in physics).

في عالم التقنية الرياضية يمكنه حل المشاكل القائمة منذ فترة طويلة في نظرية الكم؛ الميكانيكا الموجية. بدأت ميكانيكا المصفوفات والجبر الكمي من صورة الإلكترون كجسيمة وهو ينتقل من حالة كمية إلى أخرى. لكن ماذا عن اقتراح دي برويل عن أن الإلكترون، والجسيمات الأخرى، يجب التفكير فيها كموجات؟

نظرية شرودنجر

عندما كانت ميكانيكا المصفوفات والجبر الكمي تخطوان أولى خطواتهما المتواضعة على مسرح الأحداث العلمية، كان هناك الكثير من الأنشطة الأخرى في مجال نظرية الكم. ويبدو أن العلم الأوربي كان يجيش بخميرة من الأفكار التي حان أوانها، فقد ظهرت فجأة أفكار مختلفة في مواقع مختلفة ليست بالضرورة بالترتيب المنطقي نفسه، وقد «اكتشف» أشخاص مختلفون الكثير من هذه الأفكار في الوقت نفسه تقريبًا. وبحلول نهاية عام ١٩٢٥ كانت نظرية دي برويل عن موجات الإلكترونات قد ظهرت بالفعل على مسرح الأحداث، غير أن التجارب الدقيقة الحاسمة التي أثبتت الطبيعة الموجية للإلكترون لم تكن قد أجريت بعد، وبعيدًا عن أبحاث هايزنبرج ورفاقه تمامًا، أدى ذلك إلى اكتشاف آخر وهو ميكانيكا الكم القائمة على فكرة الموجات.

جاءت الفكرة من دي برويل عن طريق أينشتاين، كان من الممكن أن تظل أبحاث دي برويل محجوبة لسنوات، فقد كانت تعتبر مراوغة رياضية مثيرة ليس أكثر، وليس لها واقع فيزيائي لولا أن وقع عليها اهتمام أينشتاين. فقد كان أينشتاين هو الذي أخبر بورن بهذه الفكرة وبذلك أطلق قطار الأبحاث التجريبية التي برهنت على حقيقة موجات الإلكترونات، وكان أحد مقالات أينشتاين المنشور في فبراير/شباط ١٩٢٥، الذي قرأ إيرفين شرودنجر فيه تعليق أينشتاين على بحث دي برويل: «أنا أعتقد أنها تتضمن ما هو أكثر من مجرد تشبيه.» كان الفيزيائيون في تلك الأيام يتلقفون كل

كلمة ينطق بها أينشتاين، وكانت إيماءة بالرأس منه كافية لدفع شرودنجر لدراسة التضمينات التي اتخذت فكرة دي برويل بالقيمة التي تستحقها.

كان شرودنجر هو الشخص المنفرد الغريب بين الفيزيائيين الذين طوروا نظرية الكم الجديدة، وقد ولد سنة ١٨٨٧ وكان في التاسعة والثلاثين عندما أكمل أعظم مساهماته في العلم، وهو عمر متقدم بوضوح بالنسبة لبحث علمي أصيل له مثل تلك الأهمية. وحصل على درجة الدكتوراه سنة ١٩١٠ وشغل منذ سنة ١٩٢١ منصب أستاذ الفيزياء في زيوريخ، وهو المنصب الذي يشكل الاحترام العلمي وليس المصدر المؤهل لطرح الأفكار الثورية الجديدة. ولكن، كما سنرى، فإن طبيعة مساهمته في النظرية الكمية كانت كما هو متوقع منه كفرد من الجيل الأكبر سنًّا في منتصف العشرينيات من القرن العشرين. وعندما قامت مجموعة جوتنجن وديراك كذلك بجعل النظرية الكمية أكثر تجريدًا وفصلها عن الأفكار الفيزيائية اليومية، حاول شرودنجر الاحتفاظ بالمفاهيم الفيزيائية سهلة الفهم، ووصف الفيزياء الكمية بمصطلحات الموجات، وهي سمات مألوفة في عالم الفيزياء، وحارب حتى النهاية طوال حياته ضد الأفكار الجديدة عن عدم التحديد والقفز (الانتقال) اللحظي للإلكترونات من حالة إلى أخرى. وقد منح الفيزياء أداة عملية ثمينة لحل المشكلات، لكن كانت الميكانيكا الموجية الخاصة به بمصطلحات المفاهيم خطوة إلى الوراء، وعودة إلى أفكار القرن التاسع عشر.

حدد دي برويل الطريق بواسطة فكرته عن أن الإلكترونات والموجات «في مدار» حول نواة الذرة لا بد أن تتواءم مع أطوال موجات صحيحة في كل مدار، وبذلك تكون المدارات البينية «محرمة». وقد استخدم شرودنجر رياضة الموجات لحساب مستويات الطاقة المسموح بها في مثل هذا الوضع، وقد أصيب بالإحباط في البداية لحصوله على إجابات لا تتفق مع أنساق الطيف الذري المعروفة، وفي الحقيقة لم يكن هناك خطأ في تقنيته، والسبب الوحيد وراء فشله الأول هو أنه لم يأخذ في حساباته الحركة المغزلية للإلكترون (سبين) وبالكاد تفاجأ أن مفهوم سبين (الحركة المغزلية) للإلكترون لم يكن قد بزغ بعد سنة ١٩٢٥. وهكذا نحى شرودنجر هذا البحث جانبًا

لعدة أشهر، وبذلك ضاعت عليه فرصة أن يكون أول من ينشر معالجة رياضية متوافقة ومنطقية وكاملة للكوانتا، وقد رجع إلى الفكرة عندما طُلب منه إعطاء حلقة دراسية لشرح أبحاث دى برويل، وكان أن اكتشف أنه لو تخلص من التأثيرات النسبية في حساباته لأمكنه الحصول على توافق جيد مع مشاهدات الذرات في الأوضاع التي بها التأثيرات النسبية غير هامة، وكما بين ديراك فيما بعد، فإن سبين الإلكترون خاصية نسبية في الأساس (وهى ليست مثل الخاصية المسماة سبين للأجسام الدوارة في حياتنا اليومية). وهكذا نشرت مساهمات شرودنجر الكبرى في نظرية الكم في سلسلة من المقالات سنة ١٩٢٦، وذلك مباشرة في أعقاب مقالات هايزنبرج وبورن وجوردان وديراك.

وما معادلات تنويعات شرودنجر على موضوع الكوانتم إلا أعضاء في العائلة ذاتها من المعادلات التي تصف موجات حقيقية في عالمنا اليومي؛ موجات على سطح المحيط، أو موجات الصوت التي تحمل الضجيج خلال الغلاف الجوى. وقد رحب عالَم الفيزياء بكل حماس بهذه المعادلات، وتحديدًا لأنها بدت مريحة ومألوفة للغاية، ولا يمكن أن يكون مدخلان للمشكلة مختلفين أكثر من ذلك؛ فقد استبعد هايزنبرج عامدًا أي صورة للذرة وتعامل مع مصطلحات لمقادير من الممكن قياسها بالتجربة فقط، وفي لب نظريته، مع ذلك، كانت تقبع فكرة كون الإلكترونات جسيمات. أما شرودنجر فقد بدأ من صورة فيزيائية واضحة عن الذرة وأنها كينونة «حقيقية»، وفي لب نظريته، كانت فكرة كون الإلكترونات موجات موجودة، وقد أنتج المدخلان فئات من المعادلات التي وصفت بدقة سلوك الأشياء التي من الممكن قياسها في عالم الكم.

كان ذلك مذهلًا لأول وهلة، ومع ذلك، فقد أثبت الأمريكي كارل إيكارت Carl Eckart — ثم تلاه ديراك — رياضيًّا أن الفئات المختلفة من المعادلات كانت متكافئة مع بعضها في الحقيقة، وأنها وجهات نظر مختلفة لعالم رياضي واحد، وذلك قبل شرودنجر بوقت طويل. وتتضمن معادلات شرودنجر كلًّا من العلاقة غير التبادلية والعامل الحاسم $\hbar/i$، بالطريقة

نفسها أساسًا التي يظهران بها في ميكانيكا المصفوفات والجبر الكمي. وقد أدى اكتشاف أن المداخل المختلفة للمشكلة كانت في الحقيقة متكافئة رياضيًّا بعضها مع بعض إلى تقوية ثقة الفيزيائيين بها جميعًا، ويبدو أنه إذا استخدمت أي شكل خارجي رياضي عند تعاملك مع المشاكل الأساسية لنظرية الكوانتم، فإنها ستقودك بالضرورة إلى «الإجابات» نفسها. وبلغة الرياضيات، فإن تنويعات ديراك على هذا الموضوع هي الأشمل، حيث يتضمن الجبر الكمي الخاص به كلًّا من ميكانيكا المصفوفات وميكانيكا الموجات كحالات خاصة. وكان من الطبيعي أن اختار فيزيائيو العشرينيات من القرن العشرين النسخة الأكثر ألفة من المعادلات، وهي موجات شرودنجر، التي كان يمكنهم فهمها بالمصطلحات اليومية، والتي كانت معادلاتها مألوفة من مشاكل الفيزياء اليومية؛ الضوء والهيدروديناميكا وما شابه ذلك، غير أن نجاح نسخة شرودنجر نفسه للقصة، قد يكون هو الذي شد الفهم الأساسي لعالم الكوانتم إلى الوراء على مدى عقود.

خطوة للوراء

إذا نظرنا بعد هذه الأحداث يبدو من المفاجئ أن ديراك لم يكتشف (أو يخترع) ميكانيكا الموجات، لأن المعادلات التي طورها هاملتون وأثبتت أنها مفيدة جدًّا في ميكانيكا الكم تمتد أصولها إلى القرن التاسع عشر وإلى محاولة توحيد نظريتي الموجات والجسيمات للضوء. ولد السير وليم هاملتون في دبلن سنة ١٨٠٥ ويعتبره الكثيرون عالم الرياضيات الأول في عصره، وكان أعظم إنجازاته — مع أنها لا تعتبر كذلك في ذلك الزمن — هو توحيد قوانين الضوء والديناميكا في إطار رياضي موحد؛ فئة واحدة من المعادلات يمكن استخدامها لوصف حركة الموجة وحركة الجسيمة. نشر هذا البحث في أواخر عشرينيات وأوائل ثلاثينيات القرن التاسع عشر، وقد اعتنق مؤلفون آخرون كلًّا من السمتين. فقد كان كل من الميكانيكا والضوء مفيدًا للباحثين في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، إلا أنه لا يكاد قد لاحظ أحد أي

ازدواج للميكانيكا مع الضوء في منظومة واحدة، وهذا ما كان محل الاهتمام الحقيقي لهاملتون. ويكمن التضمين الواضح لبحث هامتلون في إحلال مفهوم الموجات محل «أشعة» الضوء، وبذلك تحل حركة الموجة محل مسار الجسيمات في الميكانيكا. لكن فكرة كهذه كانت غريبة على فيزياء القرن التاسع عشر لدرجة أنه لم ينطق بها أحد، حتى هاملتون نفسه، ولم يكن سبب رفض هذه الفكرة أنها هراء، إنما كانت — بالمعنى الحرفي — شاذة وغريبة ولا يمكن أن يوافق عليها أحدٌ؛ لقد كان ذلك استنتاجًا من المستحيل أن يتوصل إليه أي فيزيائي من القرن التاسع عشر، وكان من المحتم أن تنتظر هذه الفكرة لتصبح واقعًا فقط بعد ثبوت عدم مواءمة الميكانيكا الكلاسيكية لوصف العمليات الذرية. لكن إذا أخذنا في الحسبان أن هاملتون هو الذي اخترع الصورة الرياضية التي فيها $a \times b \neq b \times a$، فلا مبالغة في أن نصف سير وليم هاملتون بأنه مؤسس ميكانيكا الكم المنسي، ولو عاش الرجل في الوقت المناسب، لأمكنه التقاط الارتباط بين ميكانيكا المصفوفات وميكانيكا الموجات، وكان ديراك مؤهلًا لفعل ذلك لكنه أخطأ في إدراك الارتباط في البداية؛ فقد كان طالبًا منغمسًا بعمق — قبل كل شيء — في أول بحث كبير له، وهناك حدود لما يمكن أن يقوم به رجل واحد في بضعة أسابيع. وقد يكون من الأهمية أنه كان يتعامل مع أفكار تجريبية، ويتتبع محاولة هايزنبرج لفصل الفيزياء الكمية عن الصورة اليومية المألوفة للإلكترونات التي تدور حول النواة، ولم يكن يتوقع أن يقع على صورة حسية فيزيائية رائعة للذرة. وما لم يرحب به الناس وقتها هو أن ميكانيكا الموجات نفسها لا تقدم مثل هذه الصورة المألوفة على الرغم من توقعات شرودنجر.

ظن شرودنجر أنه قد تخلص من القفزات الكمية من حالة لأخرى بإدخال الموجات في نظرية الكم، وكان يتصور أن «انتقال» الإلكترون من حالة للطاقة إلى حالة أخرى كشيء مشابه لتغير اهتزاز (ذبذبة) وتر الكمان من نوتة إلى أخرى (من نغمة إلى أخرى)، وكان يعتقد أن الموجة في معادلاته الموجية هي موجة للمادة التي جاء بها دي برويل. لكن عندما

بحث باحثون آخرون ليجدوا المغزى وراء المعادلات، تبخرت هذه الآمال في الاحتفاظ بالفيزياء الكلاسيكية في المركز، فمثلًا كان بور محتارًا ومرتبكًا من مفهوم الموجة؛ فكيف يمكن لموجة أو فئة من الموجات المتداخلة أن تجعل عداد جايجر ينبض كما لو كان قد سجل جسيمة مفردة؟ الذي كان في الواقع «يتموج» داخل الذرة؟ وكيف يمكن حسم تفسير طبيعة إشعاع الجسم الأسود بمصطلحات موجات شرودنجر؟ وهكذا دعا بور شرودنجر لتمضية بعض الوقت في كوبنهاجن، حيث تناولا هذه المشكلات وتوصلا إلى حلول لم ترق كثيرًا لشرودنجر.

أولًا: تبين أن الموجات نفسها — عند فحصها عن قرب — شيء تجريدي مثل أعداد q لديراك، وقد أظهرت الرياضيات أنها لا يمكن أن تكون موجات حقيقية في الفراغ، مثل الرقرقات على سطح البركة، لكنها كانت تمثل صورة معقدة من الذبذبات في فراغ رياضي تخيلي يدعى الفراغ الشكلي، وما هو أسوأ من ذلك، أن كل جسيمة (كل إلكترون مثلًا) يحتاج أبعادًا ثلاثة خاصة به. فإلكترون وحيد يمكن وصفه بواسطة معادلة موجة في فراغ شكلي ثلاثي الأبعاد، ولوصف إلكترونين يتطلب الأمر فراغًا شكليًّا سداسي الأبعاد، وتتطلب ثلاثة إلكترونات تسعة أبعاد، وهكذا، أما إشعاع الجسم الأسود، فحتى عندما يتحول كل شيء إلى لغة ميكانيكا الموجات، فإن الحاجة إلى كوانتا منفصلة، والقفزات الكمية ستظل قائمة. كان شرودنجر مشمئزًّا وقال ملحوظته التي اقتبست غالبًا مع تنويعات طفيفة في الترجمة: «لو كنت أعلم أننا لن نتخلص من عملية القفز الكمية اللعينة، لما أقحمت نفسي في هذا العمل.» وكما وضح هايزنبرج في كتابه الفيزياء والفلسفة، ... لم تحل تناقضات الازدواجية من صورة الموجة وصورة الجسيمة، لكنهما تخفيا بشكل أو بآخر في المخطط الرياضي.

وبلا شك، فإن إغراء صورة الموجات الفيزيائية الحقيقية التي تدور حول أنوية الذرات، التي أدت إلى اكتشاف شرودنجر للمعادلات الموجية التي تحمل اسمه، كان خطأً. ولم تعد ميكانيكا الموجات هي المرشد (الدليل) إلى واقعية عالم الذرة أكثر من ميكانيكا المصفوفات. لكن ميكانيكا الموجات، على

عكس ميكانيكا المصفوفات تمنحنا الخداع بوجود شيء مألوف ومريح. إنه الخداع الحميم المألوف الذي صمد حتى يومنا هذا، والذي أخفى حقيقة أن عالم الذرة مختلف كلية عن عالمنا اليومي. وقد كبرت عدة أجيال من الطلاب وأصبحوا الآن أساتذة، وكان من الممكن أن يتوصلوا إلى فهم أعمق كثيرًا لنظرية الكم لو كانوا قد أجبروا على التمسك بإحكام بالطبيعة التجريدية لمدخل ديراك، بدلًا من قدرتهم على تصور أن ما عرفوه عن سلوك الموجات في حياتنا اليومية هو الذي يقدم صورة لسلوك الذرة، وهذا هو السبب فيما يبدو لي من أنه مع الخطوات الكثيرة في تطبيق ميكانيكا الكم — كتاب الطهي الحديث — في كثير من المشكلات (ولنتذكر ملحوظة ديراك عن الفيزيائيين من الدرجة الثانية الذين يجرون أبحاثًا من الدرجة الأولى)، فإننا اليوم وبعد خمسين عامًا، لا نكاد نصل إلى وضع أفضل من فيزيائيي نهاية عشرينيات القرن العشرين فيما يتعلق بالفهم الأساسي لفيزياء الكم. وقد أدى نجاح معادلة شرودنجر كوسيلة عملية، إلى توقف الناس عن التفكير العميق حول كيفية وسبب نجاح هذه الوسيلة.

فن الطهي الكمي

تعتمد أساسيات فن الطهي الكمي — الفيزياء الكمية العملية منذ عشرينيات القرن العشرين — على أفكار طورها بور وبورن في نهاية هذه الفترة؛ قدم لنا بور الأسس الفلسفية التي يمكن بواسطتها تسوية وضع الطبيعة الازدواجية (جسيمة/موجة) في عالم الكم، وقدم لنا بورن القواعد الأساسية لاتباعها في إعداد وصفات الكم.

قال بور إن الصورتين النظريتين، فيزياء الجسيمات وفيزياء الموجات، صالحتان بالدرجة نفسها، وهما وصف يكمل بعضه للواقع نفسه. وليس كل وصف قائم بذاته كاملًا، لكن هناك ظروف تجعل من الأنسب استخدام مفهوم الجسيمة وظروف أخرى تجعل من الأنسب استخدام مفهوم الموجة. أما الكينونة الأساسية مثل الإلكترون فهي ليست جسيمة ولا موجة، لكنها تحت بعض الظروف تسلك كما لو كانت موجة، وتحت ظروف أخرى

تسلك كأنها جسيمة (وهى في الحقيقة شيء زلق). ولكن لا يمكن تحت أي ظروف اختراع تجربة تظهر الإلكترون أثناء سلوكه المزدوج مرة واحدة. وتسمى فكرة الموجة والجسيمة كمظهرين مكملين لشخصية الإلكترون المعقدة بالتكميلية complementarity.

اكتشف بورن طريقة جديدة لفهم موجات شرودنجر؛ تمثل دالة الموجة — التي يرمز لها عادة بالحرف الإغريقى ψ بساى (psi) — أهم شيء في معادلة شرودنجر، وهو الشيء الذي يقابل الرقرقات الفيزيائية على سطح بركة في حياتنا اليومية. وأثناء عمل بورن في جوتنجن جنبًا إلى جنب مع الفيزيائيين التجريبيين الذين كانوا يقومون بتجاربهم لتأكيد طبيعة الإلكترونات كجسيمات، كل يوم تقريبًا، لم يستطع أن يتقبل ببساطة أن هذه الدالة بساي تقابل موجة إلكترونات «حقيقية»، مع أنه مثل معظم الفيزيائيين في ذلك الزمن (ومنذ ذلك الزمن) قد وجد أن معادلات الموجات هي الأكثر مواءمة لحل الكثير من المشاكل، ولذلك حاول إيجاد طريقة لجمع دالة الموجة ووجود الجسيمات معًا. كانت الفكرة التي التقطها قد ذاعت وانتشرت من قبل أثناء الجدل حول طبيعة الضوء، إلا أنه قد تولاها الآن بالعناية والتنقيح. كان بورن يقول إن الجسيمات حقيقية، ولكنها بصورة أو بأخرى تنقاد بواسطة الموجة وإن شدة الموجة (أو بدقة أكثر قيمة ψ^2) في أي نقطة من الفراغ هي مقياس «لاحتمال» وجود الجسيمة في نقطة محددة، ولا يمكن أن نعرف بالتأكيد أين يمكن أن توجد جسيمة مثل الإلكترون، إلا أن دالة الموجة تمكننا من حساب احتمال وجود الإلكترون في مكان معين، في تجربة مصممة لرصد الإلكترون. وأغرب ما في هذه الفكرة أنها تعني أن أي إلكترون قد يوجد في أي مكان على الإطلاق، وكل ما في الأمر أنه من المرجح جدًّا وجود الإلكترون في بعض المواقع ومن غير المرجح أبدًا وجوده في مواقع أخرى. ولكن مثل قواعد الإحصاء التي تنص على أنه من «المحتمل» أن يتجمع كل هواء الحجرة في أركانها، فإن مفهوم بورن عن ψ قد أزاح بعض اليقين من عالم الكوانتم غير اليقيني بالفعل.

ارتبطت أفكار بور وبورن جيدًا مع اكتشاف هايزنبرج، في نهاية سنة ١٩٢٦، حول كون عدم التيقن متأصلًا في معادلات ميكانيكا الكم. فالرياضيات التي تنص على أن $pq \neq qp$ تنص كذلك على أننا لا يمكن أن نكون على يقين عن ماهية p وq، فإذا أطلقنا على p زخم الإلكترون مثلًا، واستخدمنا q كعلامة على الوضع، فإننا يمكن أن نتخيل قياس أي من p أو q بدقة شديدة. وقد ندعو مقدار «الخطأ» في قياساتنا Δp أو Δq حيث يستخدم الرياضيون الحرف الإغريقى Δ للدلالة على قطع صغيرة من المقادير المتغيرة. أما ما أظهره هايزنبرج فهو أنه إذا حاولت في هذه الحالة قياس «كل» من موقع وزخم الإلكترون فإنك لن تنجح أبدًا، لأن $\Delta p \times \Delta q$ لا بد أن تكون «دائمًا» أكبر من $\hbar$، ثابت بلانك مقسوما على 2π. وكلما زادت دقة قياس موقع جسم ما، كنّا أقل يقينًا من زخمه، أي أين يذهب. وإذا كنا نعرف زخمه بدقة شديدة، فإننا عندئذ لن نكون متأكدين من مكان وجوده، ولهذه العلاقة من عدم التيقن تضمينات بعيدة جدًّا سنناقشها في الجزء الثالث من هذا الكتاب. وأهم نقطة تستحق التقدير، مع ذلك، هي أن ذلك لا يمثل قصورًا في التجارب المستخدمة لقياس خصائص الإلكترون، إنما هي خاصية أساسية في ميكانيكا الكم: أنه لا يمكن من ناحية المبدأ قياس أزواج مفيدة من الخصائص بدقة، بما في ذلك الموقع/الزخم، في الوقت نفسه، ولا توجد حقيقة مطلقة على المستوى الكمي.*

تقيس علاقة عدم التيقن لهايزنبرج المقدار الذي يتداخل به الوصف التكميلي للإلكترون أو أي كينونة أساسية أخرى؛ فالموقع خاصية من خصائص الجسيمة، فالجسيمات يمكن رصدها بدقة. أما الموجات من ناحية أخرى، فليس لها مواقع دقيقة، لكنها تملك الزخم، وكلما زادت

* وتنطبق علاقة عدم التيقن ذاتها في عالمنا اليومي، لكن لأن p وq أكبر كثيرًا جدًّا من $\hbar$ فإن مقدار عدم التيقن المتضمن هنا كسر صغير جدًا من الخاصية الماكروسكوبية المكافئة. فثابت بلانك h هو ٦٫٦ × ١٠ ^−٢٧^ وπ أكبر قليلًا من ٣. وبحسبة تقريبية فإن $\hbar$ هي تقريبًا ١٠ ^−٢٧^. ويمكننا قياس موقع وزخم كرة الماء بدقة كما نود ذلك بتتبع حركتها عبر الطاولة، وعدم التيقن الطبيعي لشيء ما مقارنة بـ١٠ ^−٢٧^ في أي من الموقع أو الزخم لن يظهر بأي شكل في الأغراض العملية. وكما هو الحال دائما، فإن التأثيرات الكمية تصبح مهمة فقط إذا كانت الأعداد في المعادلات لها مقادير متقاربة، أو إذا كانت أقل من ثابت بلانك.

معرفتك بالسمات الموجيه للواقع، نقص ما تعرفه عن الجسيمة، والعكس بالعكس. فالتجارب المصممة لاكتشاف الجسيمات تكتشف هذه الجسيمات دائمًا، أما التجارب المصممة لاكتشاف الموجات فتكتشف الموجات دائمًا، ولا توجد تجربة تبين سلوك الإلكترون كموجة وكجسيمة في آن معًا.

أكد بور على أهمية التجارب في فهمنا لعالم الكم، ولا يمكننا اختبار الكم إلا بإجراء التجارب، وتقدم كل تجربة، في الواقع، سؤالًا عن عالم الكم، وتتخذ الأسئلة التي نسألها ألوان خبرتنا اليومية، حتى إننا نبحث عن خصائص مثل «الزخم» و«طول الموجة» ونحصل على «إجابات» نتعامل معها ونفهمها بمصطلحات هذه الخصائص. والتجارب متأصلة في الفيزياء الكلاسيكية، حتى مع علمنا أن الفيزياء الكلاسيكية لا تعمل في وصف العمليات الذرية، وقد قال بور علاوة على ذلك: إن علينا التداخل مع العمليات الذرية حتى يمكننا مشاهدتها، مما يعنى أنه لا معنى لإثارة السؤال حول ما تفعله الذرة عندما لا ننظر إليها، وكل ما نستطيع فعله، كما شرح بورن، هو حساب احتمال الحصول على نتيجة محددة من تجربة محددة.

ويُشار إلى هذا التجمع من الأفكار معًا (عدم التيقن، والتكميلية، والاحتمال، واضطراب المنظومة التي نشاهدها بواسطة المشاهد) بـ«تفسير كوبنهاجن» Copenhagen Interpretation لميكانيكا الكم، مع أنه لا أحد في كوبنهاجن (أو في أي مكان آخر) قد صاغ بكل هذه الكلمات المقولات المحددة التي تحمل اسم تفسير كوبنهاجن. وقد جاء في الواقع أحد المكونات الأساسية من ماكس بورن في جوتنجن، وهو التفسير الإحصائي لدالة الموجة. وما تفسير كوبنهاجن إلا أشياء كثيرة لأناس كثيرين، إذا لم يكن كل الأشياء لكل الرجال، وهو نفسه زلق بما يناسب عالم ميكانيكا الكم الزلق. قدم بور المفهوم لأول مرة علنًا في مؤتمر في تومو Tomo بإيطاليا في سبتمبر/أيلول ١٩٢٧، وقد كان ذلك علامة على استكمال تماسك نظرية ميكانيكا الكم في الصورة التي يمكن بها أن يستخدمها أي فيزيائي كفء لحل مشكلات الذرات والجزيئات، دون الحاجة الشديدة إلى التفكير في الأساسيات، فقط اتباع كتاب الوصفات بإرادة بسيطة والتوصل إلى النتائج.

وفي العقود التالية قدم أنصار ديراك وباولي مساهمات أساسية عديدة، وقد كرمت لجنة نوبل رواد نظرية الكم الجديدة بما يستحقون، إلا أن توزيع الجوائز قد خضع لمنطق اللجنة الغريب. وقد حصل هايزنبرج على جائزته سنة ١٩٣٢، وكان يشعر بشيء من الخزي لأن رفيقيه بورن وجوردان لم يحصلا عليها، وقد ظل بورن نفسه يشعر بالمرارة لسنوات بعد ذلك، وغالبًا ما كان يعلق بقوله إن هايزنبرج لم يعرف حتى ما هي المصفوفة حتى أخبره (بورن) بذلك، وقد كتب إلى أينشتاين سنة ١٩٥٣ قائلًا: «لم يكن لديه أي فكرة عن المصفوفة في ذلك الوقت، لكنه كان هو الذي حصد كل الجوائز عن أعمالنا المشتركة، مثل جائزة نوبل.»* وقد اقتسم شرودنجر وديراك الجائزة في الفيزياء سنة ١٩٣٣، وكان على باولي الانتظار حتى سنة ١٩٤٥ ليحصل على جائزته، وذلك عن اكتشافه لمبدأ الاستثناء، أما بورن فقد حصل في النهاية على هذا الشرف سنة ١٩٥٤ ونال جائزة نوبل عن أبحاثه حول التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم.†

ومع ذلك فإن كل هذا النشاط — الاكتشافات الجديدة في ثلاثينيات القرن العشرين، ومنح جوائز نوبل، والتطبيقات الجديدة لنظرية الكم خلال العقود التي تلت الحرب العالمية الثانية — لا يجب أن تخفي حقيقة أن عصر التقدم الأساسي كان قد انتهى في هذا الوقت. وقد نكون على حافة عصر آخر مثل ذلك العصر، وأن تقدمًا جديدًا سيحدث باستبعاد تفسير كوبنهاجن والألفة الخادعة لدالة الموجة لشرودنجر. وقبل البحث عن هذه الاحتمالات

---

* خطابات بورن-أينشتاين، صفحة ٢٠٣.

† في رأيه لم يكن ذلك مبكرًا (وحتى نكون منصفين، كان ذلك رأي كثيرين آخرين). ويتذكر في خطابات بورن-أينشتاين (صفحة ٢٢٩) أن «حقيقة أنني لم أحصل على جائزة نوبل سنة ١٩٣٢ مع هايزنبرج قد جرحتني جدًّا في ذلك الوقت، على الرغم من خطاب رقيق من هايزنبرج.» ويفسر التأخر في حصوله على التكريم والاعتراف بأبحاثه عن التفسير الإحصائي لمعادلة الموجة لمعارضة أينشتاين وشرودنجر وبلانك ودي برويل للفكرة — وبالتأكيد ليست هذه أسماء يمكن تخطيها بسهولة من قبل لجنة نوبل — ويشير إلى مرجع عابر إلى «مدرسة كوبنهاجن، التي اسمها اليوم في كل مكان تقريبًا إلى خط فكر الذي بدأته أنا»، مما يعني أن تفسير كوبنهاجن يتضمن الأفكار الإحصائية. وليست هذه مجرد ملاحظات عابرة لرجل عجوز، لكن لها أساس متين، فقد ابتهج كل من له علاقة بمجال ميكانيكا الكم بالاعتراف المتأخر بمساهمات بورن، ولم يبتهج أحد أكثر من هايزبنرج الذي علق حديثًا لجاجديش ميهرا قائلًا: «لقد تنفست الصعداء عندما حصل بورن على جائزة نوبل.» (ميهرا وريتشنبرج، الجزء الرابع، صفحة ٢٨١).

الدراماتيكية، من الإنصاف أن نوضح بدون أي لبس كم من الإنجازات أُنجز بواسطة النظرية التي اكتملت في الأساس قبل نهاية عشرينيات القرن العشرين.

الفصل السابع

مطبخ الكوانتا

يحتاج الفيزيائيون إلى معرفة عدد قليل من الأشياء البسيطة من أجل استخدام الوصفات الواردة في كتاب الطهي الخاص بالكوانتم، ولا يوجد نموذج لما تشبهه الذرة والجسيمات الأولية، ولا شيء يخبرنا ما الذي يحدث عندما لا ننظر إليها، إلا أنه من الممكن استخدام معادلات ميكانيكا الموجات (التنويعات الأكثر شيوعًا والأوسع استخدامًا) للتنبؤ على أساس إحصائي؛ فإذا أجرينا مشاهدة لمنظومة كمية وحصلنا على الإجابة A لقياساتنا، فإن المعادلات الكمية ستمدنا باحتمال الحصول على الإجابة B (أو C أو D أو أي إجابة أخرى) إذا أجرينا المشاهدة نفسها بعد وقت معين. ولا تخبرنا نظرية الكم ما الذي تشبهه الذرات، أو ما الذي تفعله عندما لا نشاهدها. وللأسف فإن معظم الناس الذين يستخدمون معادلات الموجة اليوم لا يرحبون بذلك وإنما يتصنعون تقبلهم لدور الاحتمالات. ويعرف الطلاب أن تيد باستين Ted Bastin قد أطلق «صورة بلورية لدور تيار الأفكار في نهاية عشرينيات القرن العشرين ... ما الذي يستطيعه الفيزيائي متوسط المستوى الذي لم يسأل نفسه عن رأيه في المسائل الأساسية، وكيف سيساعده هذا الرأي في العمل على حل مشاكله التفصيلية.* لقد تعلموا أن يفكروا في الموجات على أنها أمر حقيقي، والقليل منهم قد درس منهجًا في نظرية الكم دون أن يخرج منه بصورة للذرة في خياله. ويتعامل الناس مع التفسير الإحصائي دون أن يفهموه في الواقع، وهذا دليل على قوة المعادلات التي طورها شرودنجر

* نظرية الكم وما بعدها، صفحة ١.

وديراك بالتحديد، وتفسيرها الذي قدمه بورن، لدرجة أنه حتى بدون فهم السبب في نجاح الوصفات، فإن الناس قادرون على الطهي بالكوانتا بكفاءة.

كان ديراك أول رئيس طهاة للكوانتم، وكان أول شخص من خارج جوتنجن يفهم ميكانيكا المصفوفات الجديدة ثم يطورها بعد ذلك، وهو بذلك الشخص الذي أخذ ميكانيكا الموجات لشرودنجر ووضعها على أساس أكثر أمانا أثناء تطويرها أبعد من ذلك. وأثناء تطويع المعادلات لتتواءم مع متطلبات النظرية النسبية — وذلك بإضافة الزمن كبعد رابع — وجد ديراك سنة ١٩٢٨ أنه لا بد من إدخال المصطلح الذي يعتبر اليوم ممثلًا لـ«سبين» الإلكترون، وبذلك قدم بشكل مفاجئ تفسير ازدواج (انشطار) خطوط الطيف التي حيرت النظريين على مدى عقد من الزمن، وقد أطلقت عملية تحسين المعادلات نتيجة أخرى غير متوقعة، وهي النتيجة التي فتحت الطريق للتطوير الحديث لفيزياء الجسيمات.

المادة المضادة

تبعًا لمعادلات أينشتاين فإن طاقة الجسيمة التي كتلتها m وزخمها p هي:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

وهي المعادلة التي تختزل إلى $E = mc^2$ عندما يكون الزخم مساويًا للصفر، إلا أن هذه ليست كل القصة؛ لأن المعادلة الأكثر ألفة تأتي من الجذر التربيعي للمعادلة الكاملة، وفي الرياضيات لا بد من الإشارة إلى أن E قد تكون موجبة أو سالبة، تمامًا مثل −٢ × −٢ = ٤، ويمكن الجزم بأن $E = \pm mc^2$. وعندما تظهر مثل هذه «الجذور السالبة» في المعادلات، فغالبًا تُستبعد لأنها بلا معنى، و«من الواضح» أن الإجابة الوحيدة التي تهمنا هي الجذر الموجب. ولم يتخذ ديراك هذه الخطوة الواضحة لأنه عبقري، بل أخذ يفكر في حل اللغز المتضمن فيها، وعند حساب مستويات الطاقة في النسخة النسبية لميكانيكا الكم، تظهر فئتان: إحداهما كلها موجبة ويقابلها mc^2، والأخرى كلها سالبة ويقابلها $-mc^2$. وتبعًا للنظرية، فإن على الإلكترونات

أن تسقط إلى أدنى حالة غير مشغولة من الطاقة، ومعروف أنه حتى أعلى حالة طاقة سالبة أقل من أدنى حالة طاقة موجبة. إذن، ما الذي تعنيه مستويات الطاقة السالبة؟ ولماذا لا تسقط كل الإلكترونات التي في العالم في هذه الحالات وتختفي؟

توقفت إجابة ديراك على حقيقة كون الإلكترونات من الفيرميونات، وأن إلكترونًا واحدًا فقط يستطيع الدخول إلى كل حالة ممكنة (إلكترونان لكل مستوى، واحد لكل سبين). وقد فكر في أن الإلكترونات لا تسقط في حالات الطاقة السالبة لأن كل تلك الحالات قد امتلأت بالفعل، وما ندعوه «فضاء فارغ» ليس هو في الحقيقة إلا بحر من إلكترونات الطاقة السالبة، ولم يتوقف ديراك عند ذلك؛ فإذا أعطيت الإلكترون طاقة فإنه سيقفز وفق سلم حالات الطاقة، وهكذا إذا أعطينا إلكترونًا في بحر الطاقة السالبة ما يكفي من الطاقة فلا بد له من القفز إلى أعلى إلى العالم الحقيقي ليصبح مرئيًّا مثل إلكترون عادي. وللانتقال من الحالة $-mc^2$ إلى الحالة $+mc^2$ يتطلب الأمر بوضوح إدخال طاقة مقدارها $2mc^2$، وهي بالنسبة لكتلة الإلكترون نحو ١ ميجا إلكترون فولت، ويمكن بسهولة الحصول عليها في العمليات الذرية أو عندما تتصادم الجسيمات مع بعضها. وعند تصعيد الإلكترون ذي الطاقة السالبة في العالم الحقيقي، سيصبح إلكترونًا حقيقيًّا بكل المقاييس، إلا أنه سيترك خلفه ثقبًا أو حفرة في بحر الطاقة السالبة، تمثل غياب إلكترون سالب الشحنة. ويقول ديراك إن مثل هذه الحفرة أو الثقب لا بد أن تسلك مثل جسيمة موجبة الشحنة (تمامًا مثل ازدواج السالب الذي يصنع شيئًا إيجابيًّا، فإن غياب جسيمة سالبة الشحنة من بحر سالب لا بد أن يظهر كشحنة موجبة). وعندما واتته الفكرة لأول مرة، فكر في أن التماثل في الوضع لا بد أن يؤدي إلى جسيمة ذات شحنة موجبة لها الكتلة نفسها مثل كتلة الإلكترون، لكنه في لحظة ضعف عندما نشر الفكرة اقترح أن تكون الجسيمة الموجبة هي البروتون، الذي كان الجسيمة الأخرى الوحيدة في نهاية عشرينيات القرن العشرين، أو كما يصف ذلك بنفسه في «اتجاهات الفيزياء» لقد كان ذلك خطأ، وكان لا بد له أن يملك

الشجاعة للتنبؤ بأن التجريبيين لا بد أنهم سيكتشفون جسيمة غير معروفة مسبقًا لها الكتلة نفسها مثل الإلكترون إلا أنها موجبة الشحنة.

لم يتأكد أحد من الكيفية التي يتقبل بها أبحاث ديراك في البداية وقد رفضت فكرة أن البروتون هو الجسيمة المقابلة للإلكترون، ولم يتقبل أحد الفكرة بجدية كافية إلى أن اكتشف الفيزيائي الأمريكي كارل أندرسون Carl Anderson آثار جسيمة موجبة الشحنة أثناء مشاهداته الرائدة للأشعة الكونية سنة ١٩٣٢، والأشعة الكونية جسيمات حاملة للطاقة تصل إلى الأرض من الفضاء، وقد اكتشفها النمساوي فيكتور هيس Victor Hess قبل الحرب العالمية الأولى، وقد اقتسم مع آندرسون جائزة نوبل لسنة ١٩٣٦، وقد تضمنت تجارب أندرسون تتبع مسار الجسيمات المشحونة أثناء حركتها في غرفة الضباب Cloud Chamber، وهي تصميم خاص تترك فيها الجسيمات ذيلًا مثل الذيل الذي يتكثف عن الطائرات، وقد اكتشف أن بعض الجسيمات تنتج مسارًا ينحني بواسطة مجال مغناطيسي بالمقدار نفسه مثل مسار الإلكترون، لكن في الاتجاه المضاد. وكان لا بد أن تكون جسيمات لها كتلة الإلكترون نفسها لكنها موجبة الشحنة، وقد أطلق عليها اسم «بوزيترونات» Positrons. حصل أندرسون على جائزة نوبل على هذا الاكتشاف سنة ١٩٣٦، أي بعد حصول ديراك على جائزته بثلاث سنوات، وقد غير الاكتشاف من وجهة نظر الفيزيائيين حول عالم الجسيمات. وكانوا يظنون لوقت طويلٍ في وجود جسيمة ذرية متعادلة، النيوترون، التي اكتشفها جيمس تشادويك James Chadwick سنة ١٩٣٢ (وحصل بسببها على جائزة نوبل سنة ١٩٣٥)، وكانوا سعداء فرحين بفكرة تكون نواة الذرة من بروتونات موجبة ونيوترونات متعادلة، تحيط بها إلكترونات سالبة، إلا أنه لم يكن هناك مكان للبوزيترونات في هذا المخطط، وغيرت فكرة نشوء الجسيمات من الطاقة من مفهوم الجسيمات الأساسية كلية.

ومن ناحية المبدأ، يمكن أن تنشأ أي جسيمة بواسطة عملية ديراك من الطاقة، بشرط أن يصحبها دائمًا نشوء الجسيمات المضادة المقابلة لها، أو «الثقب أو الحفرة» في بحر الطاقة السالبة، ومع أن الفيزيائيين

يفضلون النُّسخ واسعة المعرفة من قصص نشوء الجسيمات اليوم، فإن القواعد لا تزال هي نفسها في معظمها، وإحدى هذه القواعد الرئيسية هي أنه عند التقاء جسيمة بجسيمتها المضادة «تسقط في الثقب أو الحفرة» مطلِقة طاقة مقدارها $2mc^2$ وتختفي، ليس في نفثة من الدخان بل في تفجير لأشعة جاما. وقد شاهد كثيرون من الفيزيائيين مسارات الجسيمات في غرف الضباب قبل سنة ١٩٣٢، وكان كثير من المسارات التي شاهدوها لا بد وأن تكون راجعة للبوزيترونات، ولكن كان يفترض أن مثل هذه المسارات دائمًا تعود إلى حركة الإلكترونات داخل أنوية الذرات وليس إلى حركة البوزيترونات مبتعدة عن النواة، حتى جاءت أبحاث أندرسون. كان الفيزيائيون منحازين ضد فكرة وجود جسيمات جديدة، أما اليوم فالوضع على العكس. ويقول ديراك: «الناس ميالون جدًّا لاقتراح جسيمة جديدة بأقل دليل على ذلك، سواء كان نظريًّا أو تجريبيًّا.» (اتجاهات الفيزياء، صفحة ١٨.) وكانت النتيجة أن حديقة حيوانات الجسيمات لا تشتمل فقط على الجسيمتين الأساسيتين المعروفتين في عشرينيات القرن العشرين، بل على أكثر من ٢٠٠، يمكن إنتاجها جميعًا بتزويد معجلات الجسيمات بالطاقة الكافية، ومعظمها غير مستقرة استقرارًا تامًّا، و«تتفكك» بسرعة لتعطي وابلًا من جسيمات أخرى وإشعاعًا. ووسط حديقة الحيوانات تلك، فقد تقريبًا كل من البروتون المضاد والنيوترون المضاد اللذين اكتشفا في منتصف خمسينيات القرن العشرين، لكنهما مع ذلك كانا تأكيدًا قويًّا لصحة الأفكار الأصلية لديراك.

صدرت كتب كاملة عن حديقة حيوانات الجسيمات، وبنى كثير من الفيزيائيين تاريخهم باعتبارهم متخصصين في تصنيف الجسيمات، لكن يبدو لي أنه لا شيء أساسي في هذه الوفرة في الجسيمات، ويشبه الوضع ما كانت عليه القياسات الطيفية قبل نظرية الكم، عندما كان علماء الطيف يستطيعون قياس وتصنيف العلاقات بين الخطوط في الأطياف المختلفة، ولكن لم تكن لديهم فكرة عن الأسباب التي وراء العلاقات التي يشاهدونها. ولا بد أن يزودنا شيء معين أكثر أساسية في الواقع، بقواعد أساسية

لعملية امتلاء الجسيمات المعروفة بالدماء، وهي وجهة النظر التي عبر عنها أينشتاين لكاتب سيرته أبراهام بيه Abraham Pais في خمسينيات القرن العشرين: «كان واضحًا أنه شعر بأن الوقت لم يحن بعد لنقلق حول مثل هذه الأشياء، وأن هذه الجسيمات قد تظهر في النهاية كحلول للمعادلات في نظرية المجال الموحد.»* وعلى مدى ثلاثين عامًا، كان يبدو أن أينشتاين على صواب حقًّا، وأن مخططًا تقريبيًّا لنظرية محتملة مُوحدة يتضمن حديقة الجسيمات، ستوضع في النهاية. وهنا يكفى الإشارة إلى التفجير الكبير في فيزياء الجسيمات منذ أربعينيات القرن العشرين الذي تمتد جذوره إلى التطور الذي أحدثه ديراك في نظرية الكم، أول وصفة في كتاب الطهي الكمي.

داخل النواة

بعد الانتصارات التي حققتها ميكانيكا الكم في تفسير سلوك الذرات، كان من الطبيعي أن يحول الفيزيائيون اهتمامهم نحو الفيزياء النووية، ومع النجاحات العملية الكثيرة (التي تتضمن المفاعل في ثرى مايل آيلاند والقنبلة الهيدروجينية) فإننا لا نزال لا نملك فكرة واضحة عما يجعل النواة تنبض مثل فكرتنا عن سلوك الذرة، وليس ذلك مفاجأة في الواقع؛ فبمعلومية نصف القطر يتضح أن النواة أصغر ١٠٠٠٠٠ (مائة ألف) مرة من الذرة، وحيث إن الحجم يتناسب مع مكعب نصف القطر، فإنه من المفيد القول إن الذرة أكبر من النواة بمقدار ألف مليون مليون (١٠^١٥) مرة، ومن الممكن قياس الأشياء البسيطة مثل كتلة وشحنة النواة. وقد أدت هذه القياسات إلى مفهوم النظائر، وهي الأنوية التي تملك العدد نفسه من البروتونات، وبذلك فهي تكوِّن ذرات لها العدد نفسه من الإلكترونات (والخصائص الكيميائية نفسها) لكنها تحتوي أعدادًا مختلفة من النيوترونات، وبذلك لها كتل مختلفة.

---

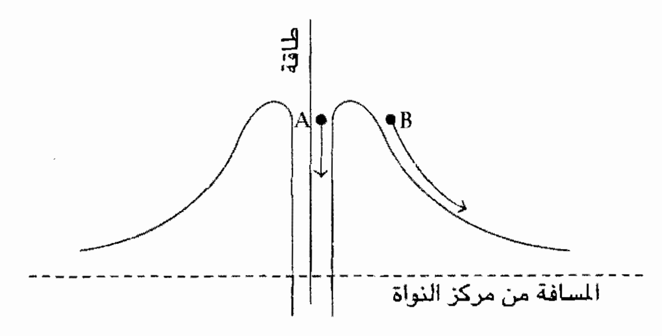
* حاذق هو الرب، صفحة ٨.

وبما أن البروتونات المرصوصة داخل النواة موجبة الشحنة، ولذا فهي تتنافر مع بعضها، ولا بد من وجود صورة أقوى من «غراء» يمسكها معًا، وهو القوة التي تعمل فقط عبر المسافات المتناهية الصغر التي تقابل حجم النواة، وتسمى القوى النووية القوية (وهناك أيضًا القوى النووية الضعيفة، وهي أضعف من القوى الكهربية لكنها تلعب دورًا مهمًّا في بعض التفاعلات النووية). ويبدو الأمر وكأن النيوترونات تلعب هي الأخرى دورًا في ثبات النواة، وببساطة لأن حساب أعداد البروتونات والنيوترونات في الأنوية المستقرة جعل الفيزيائيين يتوصلون إلى صورة أقرب شبهًا بصورة أغلفه الإلكترونات حول النواة. وأكبر عدد من البروتونات الموجودة في نواة موجودة طبيعيًّا هو ٩٢ في اليورانيوم. ومع أن الفيزيائيين قد نجحوا في إنتاج أنوية لها من البروتونات ما يصل عدده إلى ١٠٦ فإن هذا ليس مستقرًّا (ماعدا بعض نظائر البلوتونيوم التي عددها الذري ٩٤) وتتفكك إلى أنوية أخرى. وهناك ما مجموعه ٢٠٦ تقريبًا من الأنوية المعروفة المستقرة، وحالة معرفتنا بهذه الأنوية — حتى في يومنا هذا — أقل من معرفتنا بنموذج بور في وصفه للذرة، إلا أن هناك إشارات واضحة لنوع من البنى الخاصة بالنواة.

والأنوية التي لها ٢، ٨، ٢٠، ٢٨، ٥٠، ٨٢، و١٢٦ نيوكليون (نيوترون أو بروتون) بالتحديد مستقرة، والعناصر المقابلة لها أكثر انتشارًا بكثير في الطبيعة عن العناصر التي تقابل ذرات تختلف قليلًا في أعداد النيوكليونات، ولذا تسمى هذه الأعداد أحيانًا «الأعداد السحرية». لكن البروتونات تسود بنية النواة، وهناك مدى محدود من النظائر الممكنة التي تقابل أعدادًا مختلفة من النيوترونات؛ العدد الممكن من النيوترونات عمومًا أكبر قليلًا من عدد البروتونات، ويزداد في العناصر الأثقل. والأنوية التي تملك الأعداد السحرية من كل من البروتونات والنيوترونات بالتحديد مستقرة، ويتنبأ النظريون على هذا الأساس بأن العناصر فائقة الثقل التي لها نحو ١١٤ بروتونًا و١٨٤ نيوترونًا في نواتها لا بد أن تكون مستقرة، إلا أن هذه الأنوية الثقيلة لم تكتشف أبدًا في الطبيعة ولا صُنِّعت في معجلات الجسيمات بتصادم المزيد من النيوكليونات مع أثقل الأنوية الموجود في الطبيعة.

والحديد-٥٦ هو أكثر الأنوية استقرارًا، وتميل العناصر الأخف منه لاكتساب نيوكليونات لتصبح حديدًا، أما الأنوية الأثقل فتميل إلى فقد نيوكليونات وتتحرك تجاه أكثر الصور استقرارًا. وتتحول أخف الأنوية (الهيدروجين والهليوم) داخل النجوم إلى أنوية أثقل في سلسلة من التفاعلات النووية التي تدمج الأنوية الخفيفة معًا لتصنع عناصر مثل الكربون والأكسجين على طول الطريق نحو الحديد، مطلقة في النتيجة طاقة. وعندما تنفجر بعض النجوم على شكل مستعمرات عظمى، فإن طاقة الجاذبية تؤثر في العمليات النووية تأثيرًا كبيرًا، مما يدفع عمليات الدمج أبعد من الحديد لتنتج عناصر أثقل متضمنة أشياء مثل اليورانيوم والبلوتونيوم، وعندما تتجه العناصر الثقيلة إلى الوراء في اتجاه أكثر الصور استقرارًا، وذلك ببث النيوكليونات في صورة جسيمات ألفا وللإلكترونات والبوزيترونات والنيوترونات المفردة، فإنها تطلق طاقة كذلك، وهي الطاقة التي اخْتُزِنَت أساسًا منذ انفجار المستعر الأعظم منذ زمن بعيد. وجسيمة ألفا أساسًا هي نواة الهليوم وتحتوي على بروتونين ونيوترونين، ولدى انبعاث مثل هذه الجسيمة تنخفض كتلة النواة بمقدار أربع وحدات، وينخفض عددها الذري بمقدار وحدتين، وتفعل الذرة ذلك طبقًا لقواعد ميكانيكا الكم وعلاقات عدم التيقن التي اكتشفها هايزنبرج.

وتتماسك النيوكليونات مع بعضها داخل النواة بواسطة القوى النووية القوية، لكن إذا وجدت جسيمة ألفا مباشرة خارج النواة فستلفظ بشدة بواسطة القوى الكهربية. ويصنع تزاوج تأثير القوتين ما يسميه الفيزيائيون «بئر الجهد» (بئر الطاقة). ولتتصور قطاعًا يمر ببركان له جوانب تميل برفق وفوهة عميقة، إذا وضعت كرة مباشرة خارج حافة الفوهة فإنها ستتدحرج مبتعدة إلى أسفل السطح الخارجي للجبل، أما إذا وضعت الكرة مباشرة داخل حافة الفوهة فإنها ستسقط في قلب البركان. وتكون النيوكليونات داخل النواة في نفس الوضع؛ فهي داخل البئر في قلب الذرة، أما إذا تمكنت ولو مجرد أن تتخطى الحافة — حتى ولو بمقدار ضئيل — فإنها «ستتدحرج بعيدًا»، مدفوعة بالقوى الكهربية. ووفقًا للميكانيكا الكلاسيكية فإن البقية



شكل ٧-١: بئر الجهد في قلب نواة الذرة. والجسيمة في الموقع A لا بد أن تظل داخل البئر إلا إذا تمكنت من اكتساب ما يكفي من الطاقة للقفز «فوق القمة» إلى الموقع B، حيث تندفع مبتعدة «أسفل التل». ويسمح عدم التيقن الكمي للجسيمة في بعض الأحيان أن «تخترق نفقًا» من A إلى B (أو من B إلىِ A) دون أن تملك ما يكفي من الطاقة بنفسها لتتسلق التل.

من النيوكليونات أو مجموعات النيوكليونات، مثل جسيمات ألفا، لا تملك ما يكفي من الطاقة لتتسلق خارجة من البئر وتتخطى حافته، وإذا فعلت فلن تكون في البئر بالمقام الأول. وتختلف وجهة النظر الخاصة بميكانيكا الكم في هذا الوضع عما ذكرناه؛ فمع أن بئر الطاقة لا يزال يمثل حاجزًا، فإنه قابل للتخطي، وهناك احتمال محدود — وإن كان صغيرًا — أن تتواجد جسيمة ألفا في الخارج بالفعل وليس في داخل النواة. وبمصطلحات عدم التيقن تتضمن إحدى علاقات هايزنبرج الطاقة والزمن، وتنص على أن طاقة أي جسيمة يمكن تعريفها فقط في حدود مدى ΔE في فترة الزمن Δt بحيث يكون $\Delta E \times \Delta t$ أكبر من $\hbar$. وفي فترة وجيزة من الزمن تستطيع الجسيمة «استعارة» طاقة من علاقة عدم التيقن، فتكتسب ما يكفي من الطاقة لتقفز فوق حاجز الجهد قبل أن تعيد هذه الطاقة، وعندما تعود لحالتها «المناسبة» من الطاقة، تكون مجرد خارج الحاجز بدلاً من مجرد داخلة فتندفع مبتعدة.

كما يمكنك النظر إليها بمصطلحات عدم التيقن في الموقع. فالجسيمة التي لا تكاد «تنتمي» لداخل الحاجز قد تظهر خارجه، لأن وضعها مشوش بناء على ما تنص عليه ميكانيكا الكم، وكلما زادت طاقة الجسيمة أصبح هروبها أسهل، لكن ليس عليها أن تملك ما يكفي من الطاقة لتسلق بئر الجهد إلى الخارج بالطريقة التي تتطلبها النظرية الكلاسيكية، وتبدو العملية وكأن الجسيمة تخترق نفقًا من خلال الحاجز، وهي ظاهرة كمية بحتة.* وهذا هو أساس التفكك الإشعاعي، لكن لتفسير الانشطار النووي علينا أن نتجه لنموذج مختلف للنواة.

ولتنس مؤقتًا النيوكليونات المفردة في أغلفتها، واعتبر أن النواة كنقطة سائل، تمامًا مثل نقطة الماء تترجرج في أنساق متغيرة من الأشكال، ولذا يمكن تفسير بعض الخصائص الجمعية للنواة على أنها راجعة إلى تغير شكل النواة، ويمكن أن نفكر في النواة على أنها تترجرج جيئة وذهابًا، مغيرة شكلها من كرة إلى شيء يشبه دملًا منتفخًا ثم تعود كرة مرة ثانية، فإذا أضيفت طاقة إلى مثل هذه النواة، فإن التذبذب قد يصبح عظيمًا للدرجة التي تنكسر فيها النواة إلى شطرين، فتنطلق نواتان أصغر وتتناثر قطيرات دقيقة من جسيمات ألفا وبيتا والنيوترونات، وفي بعض الأنوية من الممكن قدح هذا الانشطار بواسطة اصطدام نيوترون سريع الحركة بالنواة، ويحدث تفاعل متسلسل عندما تنتج كل نواة منشطرة بهذه الطريقة عددًا كافيًا من النيوترونات ليضمن انشطار نواتين أخريين على الأقل في الجوار. وأما اليورانيوم-٢٣٥ الذي يحتوي على ٩٢ بروتونًا و١٤٣ نيوترونًا، فإنه ينتج دائمًا نواتين غير متساويتين تتراوح أعدادهما الذرية من ٣٤ إلى ٥٨، بحيث

* تسير العملية نفسها في الاتجاه المضاد عندما تندمج الأنوية معًا، فعندما يدفع الضغط داخل النجم نواتين خفيفتين معًا، فإنهما قد يندمجان معًا لو تغلبا على حاجز الجهد من الخارج، وتعتمد كمية الطاقة التي تحوزها كل نواة في هذا الوضع على درجة الحرارة في قلب النجم. وفي عشرينيات القرن العشرين تحير الفيزيائيون الفلكيون لأنهم وجدوا أن درجة الحرارة المحسوبة داخل الشمس تقل قليلًا عما يجب أن تكون عليه، ولا تملك الأنوية في قلب الشمس ما يكفي من الطاقة لتتغلب على حاجز الجهد وتندمج معًا، وفقًا للميكانيكا الكلاسيكية، والإجابة هي أن بعض هذه الأنوية تخترق نفقًا خلال الحاجز عند قيمة طاقة أقل قليلًا وفقًا لقواعد ميكانيكا الكم.

يكون مجموعهما ٩٢، وتتناثر نيوترونات حرة، ويطلق كل انشطار نحو ٢٠٠ ميجا إلكترون فولت من الطاقة، ويشعل كل انشطار عدة انشطارات أكثر بشرط أن تكون كتلة اليورانيوم كبيرة بما فيه الكفاية حتى لا تهرب كل النيوترونات منها، وإذا تركت هذه العملية لتسير بمعدل أُسِّي لتكونت بذلك قنبلة ذرية. أما إذا أبطأنا من المعدل الذي تسير به هذه العملية باستخدام مادة تمتص النيوترونات لتجعل العملية تسير مجرد سير متوسط، فإن ذلك هو مفاعل انشطار تحت التحكم من الممكن استخدامه لتسخين الماء وتحويله إلى بخار وتوليد الكهرباء. ومرة أخرى؛ الطاقة التي نستخلصها حدث تخزينها من طاقة انفجار نجم، منذ زمن بعيد وفي مكان بعيد.

وعمومًا يمكننا محاكاة عملية إنتاج الطاقة في النجوم مثل الشمس هنا على الأرض في عملية الاندماج. وحتى الآن لم نستطع سوى محاكاة الخطوة الأولى على سلم الاندماج، من الهيدروجين إلى الهليوم، ولم نستطع التحكم في التفاعل، إنما فقط تركه ليجري حتى النهاية في القنبلة الهيدروجينية أو قنبلة الاندماج. والفن في الاندماج عكس الفن في الانشطار؛ فبدلًا من تشجيع النواة الكبيرة لتنشطر، عليك أن تجبر الأنوية الصغيرة — ضد التنافر الكهروستاتيكي الطبيعي بين شحنتيهما الموجبتين — حتى تصبحًا قريبتين للدرجة التي تتغلب فيها القوى النووية القوية قصيرة المدى على القوى الكهربية وتشدهما إحداهما للأخرى، وبمجرد حصولك على عدد قليل من الأنوية التي تندمج بهذه الطريقة فإن الحرارة المتولدة أثناء العملية ستتسبب في اندفاع الطاقة إلى الخارج، مما يميل إلى تشتيت أي أنوية أخرى على وشك الاندماج، ويوقف العملية كلها في مساراتها.* ويقوم الأمل

* إحدى طرق اكتساب طاقة من الاندماج هي باتحاد أحد نظائر الهيدروجين، الذي يملك بروتونًا ونيوترونًا (ديوتيريوم)، بنظير آخر له بروتون واحد ونيوترونان (تريتيوم). والنتيجة هي نواة الهليوم (بروتونان ونيوترونان)، ونيوترون طليق، و١٧,٦ ميجا إلكترون فولت من الطاقة. وتعمل النجوم بواسطة عمليات أكثر تعقيدًا متضمنة تفاعلات نووية بين الهيدروجين وأنوية مثل الكربون الموجودة بكميات قليلة داخل النجم. وتصبح حصيلة مثل هذه التفاعلات دمج أربع بروتونات في نواة للهليوم مع إلكترونين وإطلاق ٢٦,٧ ميجا إلكترون فولت، ويدخل الكربون مرة أخرى في عملية تدوير ليحفز دورة أخرى من التفاعلات. لكن هنا على الأرض فإن التريتيوم والديوتيريوم هما اللذان تجري دراسة اندماجهما في المعامل.

في طاقة غير محدودة للمستقبل من الاندماج النووي على اكتشاف طريقة للإمساك بالأنوية معًا في مكان واحد لفترة طويلة كافية للحصول منها على كمية مفيدة من الطاقة. ومن المهم كذلك إيجاد عملية تطلق طاقة أكثر من الطاقة المستخدمة في دفع الأنوية معًا في المقام الأول. والأمر سهل بما فيه الكفاية في القنبلة؛ في الأساس، عليك إحاطة الأنوية التي ترغب في دمجها باليورانيوم، ثم تقدح اليورانيوم في تفجير انشطاري، وسيدفع الضغط في اتجاه الداخل الناتج عن الانفجار المحيط ما يكفي من أنويه الهيدروجين لتتلامس وتقدح التفجير الاندماجي الثاني الأكثر روعة وضخامة. لكن المطلوب لمحطات القوى المدنية شيئًا أكثر رقة من ذلك، وتتضمن التقنيات التي تجري دراستها استخدام مجالات مغناطيسية قويه لتعمل عمل أوعية تمسك بالأنوية المشحونة، وتقوم نبضات من الضوء من أشعة الليزر فيزيائيًّا بعصر الأنوية معًا (ضغطها معًا)، وينتج الليزر بالطبع وفقًا لوصفة أخرى من كتاب طهي الكوانتم.

الليزر والميزر

ومع أن الأمر تطلب رئيس طهاة أستاذًا مثل ديراك ليكتشف الوصفات لصنع جسيمات جديدة في مطبخ الكم، فإن العمليات النووية مفهومة بمصطلحات أقل اكتمالًا من نموذج بور للذرة، وبهذا قد لا يكون الأمر مفاجئًا بصورة كبيرة أن نجد نموذج بور لا يزال يُستخدم. ومن الممكن فهم بعض أكثر التطورات العلمية الحديثة غرابة وإثارة، وهي الليزر، بواسطة طاه للوجبات الكمية السريعة ذي خبرة يكون قد سمع بنموذج بور ولا يتطلب عبقرية كبيرة في فهمها. (تجيء العبقرية في هذه الحالة في تكنولوجيا تصميم الليزر، لكن لذلك قصة أخرى.) ولذلك، ومع الاعتذار لهايزنبرج وبورن وجوردان وديراك وشرودنجر، سنهمل كل المهارة الكمية لوهلة ونتجه للوراء إلى النموذج الحرفي للإلكترونات التي تدور حول نواة الذرة؛ تذكر أن الذرة عندما تكتسب كمًّا من الطاقة يقفز أحد الإلكترونات لأعلى إلى مدار مختلف في هذه الصورة، وأنه إذا تركت مثل هذه الذرة

وحدها فإن الإلكترون سيسقط عائدًا إلى الحالة الأرضية إن آجلًا أو عاجلًا، وسيطلق كمًّا من الأشعة محددًا بدقة وله طول موجة محدد، وتسمى هذه العملية بالإشعاع اللحظي وهي عكس الامتصاص.

وعندما كان أينشتاين يفحص مثل هذه العمليات سنة ١٩١٦ ويمهد لقواعد الأساس الإحصائي لنظرية الكم، التي وجد أنها بغيضة بعد ذلك، وأيقن أن هناك احتمالًا آخر، فمن الممكن لذرة مثارة أن تُقْدح لتطلق الطاقة الفائضة وتعود إلى الحالة الأرضية إذا ضربها إلكترون يمر بها، وتسمى هذه العملية الانبعاث الحثي، وهي تحدث فقط إذا كان طول موجة الفوتون المار مساويًا تمامًا لطول تلك التي تبدأ بها الذرة بث إشعاعاتها. وهي تشبه بالأحرى سلسلة من النيوترونات الداخلة في تفاعل انشطار نووي متسلسل، ويمكننا أن نتخيل مجموعة مرتبة من الذرات يمر بها فوتون واحد له طول الموجة المناسبة بالضبط فيثير ذرة واحدة لتشع، ويثير الفوتون الأول مع الفوتون الجديد الذي انبعث من الذرة ذرتين أخريين ليشعا، وتثير الفوتونات الأربعة أربع ذرات أخرى، وهكذا. والناتج ترتيبًا من الإشعاع له طول الموجة نفسه بالضبط، وفوق ذلك، تتحرك الموجات متوافقة بدقة بعضها مع بعض؛ ترتفع كل الموجات «لأعلى» معًا وتنخفض كل القيعان «لأسفل» معًا لينتج شعاع خالص نقي مما يسمى الإشعاع الملتحم (المتماسك). وتتواجد كل الطاقة المتحررة في الشعاع، وذلك لأنه لا توجد قمة ولا قاع يتلاشيان في مثل هذه الإشعاعات، التي يمكن إسقاطها على مساحة صغيرة من المادة التي يوجه إليها الشعاع.

عندما يثار تجمع للذرات أو للجزيئات، فإنها تملأ مدى من مستويات الطاقة، فإذا تركت لحالها فإنها ستشع أطوال موجات مختلفة من الطاقة بطريقة مختلطة وغير متماسكة، حاملة بذلك طاقة فعالة أقل مما تطلقه الذرات والجزيئات. وهناك من الحيل ما يمكن استخدامها لملء نطاق ضيق من مستويات الطاقة له الأفضلية، ثم قدح عملية عودة الذرات المثارة في هذا النطاق ذي الأفضلية إلى حالتها الأرضية. وقدح هذا الترتيب هو إدخال

ضعيف للإشعاع ذي التردد المضبوط، ويكون المخرج أشد كثيرًا، شعاعًا مُكَبَّرًا له التردد نفسه. وقد طُوِّرَت هذه التقنيات لأول مرة في أواخر أربعينيات القرن العشرين بواسطة فريقين مستقلين عن بعضهما في الولايات المتحدة وفي الاتحاد السوفيتي، وذلك باستخدام إشعاع في نطاق موجات الراديو من الطيف، التي يتراوح طولها بين ١ سم و٣٠ سم، وتسمى الإشعاع الميكروي microwave band، وقد حصل الرواد على جائزة نوبل على أبحاثهم سنة ١٩٥٤. ولأن العملية تتضمن تكبيرًا للموجات الميكروية بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع وفق أفكار أينشتاين سنة ١٩١٧، فإن الرواد قد صكوا الاسم: «microwave amplification by stimulated emission of radiation» الذي يُختصر MASER ميزر.

وقد استغرق الأمر عشر سنوات قبل أن ينجح أي أحد في إيجاد طريقة تجعل هذه التقنية تعمل بالإشعاع ذي التردد الضوئي، وسنة ١٩٥٧ وقع شخصان على الفكرة ذاتها في الوقت نفسه تقريبًا. الأول (الذي يبدو أنه كان الأول) هو جوردون جولد Gordon Gould طالب الدراسات العليا بجامعة كولومبيا، أما الآخر فكان تشارلز تاونس Charles Townes، أحد رواد الميزر الذي اقتسم جائزة نوبل لسنة ١٩٦٤. وقد ظل الجدل والنقاش حول من بالضبط الذي قام بالاكتشاف وما الذي اكتشفه ومتى تم ذلك، إنه موضوع معركة قانونية عن حقوق المخترعين، وذلك لأن الليزر، وهو المكافئ الضوئي للميزر (من كلمة light، «و... light amplification») قد أصبح الآن مجالًا كبيرًا للأعمال والأموال الضخمة، لكن لحسن الحظ ليس علينا أن نورط أنفسنا في هذا الموضوع، وهناك العديد من الأنواع المختلفة لليزر اليوم، أبسطها الليزر الجامد بالضخ الضوئي.

وفي هذا التصميم تُحَضَّر ساق من مادة (مثل العقيق) وتصقل نهايتاها وتحاط بمصدر لضوء قوي، أنبوبة تفريغ كهربي خلال غاز، التي تومض بسرعة وتنطفئ مولدة نبضات من الضوء لها ما يكفي من الطاقة لإثارة الذرات في الساق، ويحفظ الجهاز كله باردًا لضمان أقل تداخل من الإثارة الحرارية للذرات في الساق، أما الومضات الضوئية القوية من المصباح

فتستخدم لحث (أو ضخ) الذرات إلى الحالة المثارة. وعند قدح الليزر تنطلق نبضة نقية من ضوء العقيق، تحمل آلاف وحدات الوات من الطاقة، من طرف الساق المستوي.

وتتضمن تنويعات هذا الموضوع الليزر السائل، وليزر الصبغة الفلورسنتية، وليزر الغاز، وهكذا. وتشترك جميعها في السمة الأساسية؛ إدخال طاقة غير متماسكة وخروج ضوء متماسك حاملًا لكثير من الطاقة. وتعطي بعض هذه التنويعات، مثل ليزر الغاز شعاعًا مستمرًّا نقيًّا من الضوء، يمثل النهاية «الحافة المباشرة» لأغراض المسح، الأمر الذي وجد استخدامات واسعة في حفلات الروك والإعلانات. ويُنتج البعض الآخر نبضات قصيرة قوية من الطاقة يمكن استخدامها لحفر الثقوب في الأجسام الصلبة (وقد تجد استخدامات عسكرية يومًا ما). وتستخدم أدوات القطع بالليزر في أوضاع متنوعة مثل صناعة الملابس والجراحات الدقيقة، وقد تستخدم أشعة الليزر في حمل المعلومات بكفاءة أعلى من موجات الراديو لأن كمية المعلومات التي يمكن تمريرها في الثانية الواحدة تتناسب مع تردد الإشعاع المستخدم. وتُقرأ علامات «باركود» bar codes الموجودة على كثير من منتجات الأسواق المجمعة (وعلى غلاف هذا الكتاب) بواسطة جهاز ليزر ماسح؛ وتمسح الأقراص المدمجة وأقراص الفيديو الموجودة في الأسواق منذ بداية ثمانينات القرن العشرين بواسطة الليزر، أما الصور ثلاثية الأبعاد أو الهولوجرامات، فمن الممكن إنتاجها بمساعدة الليزر، وهكذا.

والقائمة عمليًّا بلا نهاية، وحتى قبل أن نضمن تطبيقات الميزر في تكبير الإشارات الواهنة (من أقمار الاتصالات مثلًا) والرادار وأشياء أخرى، ولا تنبع كلها من نظرية الكم الحقيقية، ولكنها تأتي من النسخة الأولى لفيزياء الكم، وعندما تحصل على كيس من الفشار ويمسحه شعاع الليزر — لدى خروجك من السوق — أو عندما تذهب إلى حفلة روك بألعاب الليزر الملونة المذهلة، أو عندما نشاهد حفلة في التليفزيون عن طريق الأقمار الصناعية التي تنقل الإشارات حول العالم، أو عندما تستمع إلى آخر التسجيلات لنفس الفرقة على أحدث هاي فاي (الصوت المنقول بأمانة بالغة) لقرص مدمج،

فإن الفضل في كل ذلك يرجع لألبرت أينشتاين ونيلز بور، اللذين وضعا مبادئ البث المحفز منذ أكثر من ستين عامًا مضت.

الميكرو الجبار

لا شك أن التأثير الأوسع انتشارًا لميكانيكا الكم في حياتنا اليومية يقع في مجال فيزياء الجوامد (الحالة الجامدة). والاسم «الحالة الجامدة» ليس رومانسيًّا، فحتى لو كنت قد سمعت به، فإنك لا تربطه على الأرجح بنظرية الكم، ومع ذلك فهو فرع الفيزياء الذي منحنا الراديو الترانزستور ووكمان سونى، والساعات الرقمية، وحواسب الجيب، والحاسوب الميكرو، والغسالات المبرمجة، وليس تجاهل فيزياء الحالة الجامدة لأنها فرع من العلوم لا يعرفه إلا القليلون، ولكن لأنها مألوفة للدرجة التي نأخذها كمسلمة. ومرة أخرى نقر بأننا لم نكن لنملك أيًّا من هذه الأجهزة لولا الإمساك القوي بمطبخ الكوانتم.

تعتمد كل الأجهزة المذكورة في الفقرة السابقة على خصائص أشباه الموصلات، وهي جوامد لها منطقيًّا خصائص وسط بين خصائص الموصلات وخصائص العوازل. ودون الدخول في التفاصيل، فالعوازل هي المواد التي لا توصل الكهرباء، وهي لا توصل الكهرباء لأن الإلكترونات في ذراتها ممسوكة بإحكام بواسطة النواة، وفقًا لقواعد ميكانيكا الكم. أما في الموصلات، مثل الفلزات، فكل ذرة تملك بعض الإلكترونات التي ترتبط بضعف مع النواة وموجودة في حالة من الطاقة مرتفعة بالقرب من قمة بئر جهد الذرة، وعندما تتجمع الذرات معًا في شكل جامد، يمتزج قمة أحد آبار الطاقة ببئر الطاقة الذي ينتمي للذرة المجاورة، وتصبح الإلكترونات في هذه المستويات المرتفعة حرة لتتجول بين الذرات من نواة ذرة إلى أخرى، ولا ترتبط بنواة معينة بعد ذلك لتصبح قادرة على حمل التيار الكهربي خلال الفلز.

وفي النهاية فإن خاصية التوصيل تعتمد على إحصاء فيرمي-ديراك التي تحرم على هذه الإلكترونات ضعيفة الارتباط السقوط عميقًا في آبار الجهد الذرية، حيث كل حالات الطاقة للإلكترونات المرتبطة بقوة مشغولة

بالكامل، وإذا حاولت ضغط (كبس) الفلز فإنه سيقاوم الضغط؛ فالفلزات قوية، والسبب وراء قوة الفلزات وشدة مقاومتها للضغط هو مبدأ باولي للاستثناء للفرميونات، ولا يمكن ضغط الإلكترونات أكثر من ذلك معًا.

وتستخدم معادلات ميكانيكا الكم للموجات في حساب مستويات الطاقة للإلكترونات في الجوامد، ويقال للإلكترونات الممسوكة بقوة للنواة إنها في نطاق التكافؤ للجامد، أما الإلكترونات التي لها حرية التجول من نواة إلى أخرى فيقال إنها في نطاق التوصيل. وتقع جميع الإلكترونات في العوازل في نطاق التكافؤ، وفي الموصل تنغمس بعض الإلكترونات في نطاق التوصيل.* وفي أشباه الموصلات يكون نطاق التكافؤ ممتلئًا، وهناك فقط فجوة ضيقة من الطاقة بين هذا النطاق ونطاق التوصل، عادة مقدارها ١ إلكترون فولت. ولذا فمن السهل على الإلكترون أن يثب إلى نطاق التوصيل وحمل التيار الكهربي خلال المادة، وعلى عكس الوضع في الموصلات، فإن هذا الإلكترون الذي اكتسب طاقة يترك خلفه حفرة في نطاق التكافؤ. وبالطريقة نفسها التي فكر بها ديراك لنشوء الإلكترونات والبوزيترونات من الطاقة، فإن غياب الإلكترون سالب الشحنة من نطاق التكافؤ يسلك مثل شحنة موجبة مادام الموضوع يتعلق بالخصائص الكهربية. وهكذا فإن أشباه الموصلات الطبيعية تملك بضعة إلكترونات في نطاق التوصيل، وكذلك بضعة حفر موجبة الشحنة في نطاق التكافؤ، وكلاهما يمكن أن ينقل التيار الكهربي، ويمكنك أن تتخيل الإلكترونات المتتابعة وهي تسقط في الحفرة الموجودة في نطاق التكافؤ تاركة حفرة خلفها ليقفز فيها الإلكترون التالي، وهكذا، أو يمكن تخيل الحفر وكأنها جسيمات موجبة تتحرك في الاتجاه المضاد؛ فمادام الموضوع يتعلق بالتيارات الكهربية فللأمرين التأثير نفسه.

وقد تكون أشباه الموصلات الطبيعية مثيرة بما فيه الكفاية، على الأقل ليس بسبب محاكاتها الصرفة لنشوء زوج إلكترون-بوزيترون، غير أنه من الصعب التحكم في خصائصها الكهربية، والتحكم هو الذي جعل هذه المواد

* هناك في الواقع نوع آخر من الموصلات التي يكون فيها نطاق التكافؤ نفسه غير ممتلئ، ولذا تستطيع الإلكترونات الحركة في حدود نطاق التكافؤ.

على هذه الدرجة من الأهمية في حياتنا اليومية، ويتحقق التحكم بتخليق أشباه موصلات صناعية، ويسود الإلكترونات الحرة أحد أنواعها، وتسود «الحفر» الحرة النوع الآخر.

ومرة أخرى من السهل فهم هذا الأمر لكن من الصعب ممارسته عمليًّا، ففي بلورة الجيرمانيوم تملك كل ذرة أربعة إلكترونات في غلافها الخارجي (هذه وصفة وجبة سريعة من مطبخ الكوانتم، ويناسبها نموذج بور في أداء المهمة)، و«تقتسم» هذه الإلكترونات مع الذرات المجاورة لتصنع الأربطة الكيميائية التي تتماسك بواسطتها البلورة؛ فإذا «دُمِّمَ» الجرمانيوم ببضع ذرات من الزرنيخ، فستحتفظ ذرات الجرمانيوم بسيادتها على بنية الشبكة البلورية، وعلى ذرات الزرنيخ أن تحشر نفسها بأفضل ما يمكنها، وبمصطلحات الكيمياء فإن الفرق الأساسي بين الزرنيخ والجرمانيوم هو امتلاك الزرنيخ لإلكترون خامس في غلافه الخارجي، وأفضل طريقة تحشر بها ذرة الزرنيخ نفسها في الشبكة البلورية للجرمانيوم هي التخلص من الإلكترون الخامس وتتخذ أربعة أربطة كيميائية مدعية (أو لاعبة دور) أنها ذرة جرمانيوم، وتتجول الإلكترونات الزائدة التي أمدت بها ذرة الزرنيخ المنظومة في نطاق التوصيل لشبه الموصل الذي تخلق بهذه الطريقة، ولا توجد حفر في المقابل، ويطلق على مثل هذه البلورة شبة موصل من النوع-n.

والبديل لذلك هو تدميم الجرمانيوم (ملتزمين بالمثال الأصلي) بالجاليوم، الذي له ثلاث إلكترونات فقط متاحة للربط الكيميائي، ويجيء التأثير كما لو كنا قد أوجدنا حفرة في نطاق التكافؤ بكل ذرة جاليوم موجودة، وتتحرك إلكترونات التكافؤ بالقفز في الحفر التي تسلك مثل الشحنات الموجبة، وتسمى مثل هذه البلورة شبه موصل من النوع-p. وتصبح الأمور مثيرة عندما يتلامس النوعان من أشباه الموصلات مع بعضهما؛ تنشئ الزيادة من الشحنة الموجبة في أحد الجوانب من الحاجز والشحنة السالبة على الجانب الآخر فرق جهد كهربي يحاول دفع الإلكترونات في اتجاه معين ومقاومة حركتها في الاتجاه الآخر، ويسمى مثل هذا

الزوج المتصل من البلورات شبه الموصلة «ديود»، وهو يسمح بفعالية للتيار الكهربي بالمرور في اتجاه واحد فقط. وبصورة ألطف قليلًا، يمكن تشجيع الإلكترونات لتقفز فوق الفجوة من n إلى p في الحفرة، وتبعث في هذه الأثناء شرارة من الضوء، وتسمى الديودات المصممة لإنتاج الضوء بهذه الطريقة الديودات الباعثة للضوء أو LEDs اختصارًا (Light emit-ting diodes) وتستخدم من أجل إظهار الأرقام في حواسب الجيب والساعات وأشياء أخرى ذات شاشات إظهار. أما الديود، الذي يعمل في الاتجاه المضاد، أي يمتص الضوء ويضخ إلكترونًا خارج الحفرة إلى نطاق التوصيل، فهو الفوتوديود Photodiode، ويستخدم للتأكيد على مرور تيار كهربي فقط عندما يسقط شعاع ضوء على شبه الموصل، وهذا هو أساس التصميم الذي يفتح الأبواب أوتوماتيكيًّا عندما تتحرك أمام شعاع الضوء، إلا أن هناك المزيد من الاستخدامات لأشباه الموصلات أكثر من الديودات.

إذا وضعت ثلاث قطع من أشباه الموصلات معا على شكل ساندويتش (npn أو pnp)، يكون الناتج ترانزستور (تتصل كل قطعة ترانزستور عادة بدائرة كهربية، وبذا فإن الترانزستورات في جهاز الراديو الذي تملكه مثلًا يمكن تعريفه بواسطة الأرجل العنكبوتية الثلاث التي تخرج من الفلز أو البلاستيك الذي يحتوي شبه الموصل نفسه). ومن الممكن، باستخدام المواد المدممة بطريقة مناسبة، تصنيع ترتيب يتسبب فيه مرور تيار صغير من الإلكترونات، عبر اتصال np، في حدوث تيار أكبر كثيرًا عبر اتصال آخر في الساندوتش، يعمل الترانزستور كمكبر. وأي شخص يعمل بالإلكترونيات يعلم أن المكونين الديود والمكبر هما المفتاح لتصميم أي منظومة صوتية. لكن حتى الترانزستورات أصبحت قبعة قديمة جدًّا اليوم، ولن تجد أي كأس لها ثلاثة أرجل في جهاز الراديو إلا إذا كان «قديمًا».

وحتى الخمسينيات من القرن العشرين، كنا نعتمد على جهاز اللاسلكي المزعج القديم في التسلية، وهو على الرغم من اسمه، كان محشوًّا حتى النهاية بالأسلاك وصمامات التفريغ المتوهجة التي كانت تقوم بالعمل نفسه

الذي تقوم به أشباه الموصلات الآن. وبحلول نهاية الخمسينيات، كانت ثورة الترانزستور في الأفق، وحلت الترانزستورات محل الصمامات الكبيرة المتوهجة، في الوقت الذي حلت فيه الألواح التي طُبعت الدوائر الكهربية عليها محل الأسلاك، ولحمت الترانزستورات في هذه الألواح. ولم تكن الدوائر المتكاملة إلا على بعد خطوة صغيرة حيث كانت كل الدوائر والمكبرات وأشباه الموصلات والديودات وغيرها مجمعة معًا في قطعة واحدة توصل معًا لتصنيع قلب جهاز الراديو، وجهاز التسجيل، أو أي شيء آخر، وفي الوقت نفسه كانت ثورة مماثلة تتخذ طريقها في صناعة الحواسيب.

كانت الحواسيب الأولى مثل أجهزة اللاسلكي القديمة كبيرة ومزعجة، كانت مملوءة بالصمامات وتحتوي أميالًا من الأسلاك. وحتى منذ عشرين عامًا ومع أول زخم شامل لثورة الحالة الجامدة، كان «دماغ» الحاسوب الذي يستطيع القيام بعمل الميكرو حاسوب الذي في حجم آلة كاتبة، في مساحة الطابق الأرضي لمنزل، ويتطلب مساحة أكبر من ذلك لنصب أجهزة التكييف المرافقة له، والثورة التي وضعت ذلك النوع من قوة الحساب في آلة فوق الطاولة سعرها بضع مئات من الدولارات هي نفسها التي حولت جهاز الراديو اللاسلكي لأجدادنا إلى راديو في حجم علبة سجائر، وأخذت ثورة الحالة الجامدة من الترانزستور إلى الشيب.

تعمل الأدمغة والحاسوب الإلكترونى بآلية التحويل. يحتوي دماغك على نحو ١٠٠٠٠ (عشرة آلاف) مليون تحويلة على شكل خلايا عصبية (عصبونات)، أما الحاسوب فتحويلاته مصنوعة من الديودات والترنزاستورات. وسنة ١٩٥٠ كان حاسوب له عدد التحويلات نفسه مثل دماغك سيشغل حجم جزيرة مانهاتن، أما اليوم وبوضع الشيبات الميكروية معا، قد يكون من الممكن ترتيب العدد نفسه من التحويلات في حجم مساو للدماغ البشرية، مع أن الوصلات السلكية بين مكونات الكمبيوتر مشكلة كبرى لم تحل بعد، ويبين هذا المثال مدى صغر الشيب، حتى مقارنة بالترانزستور.

وأشباه الموصلات المستخدمة في الشيبات الميكروية اليوم هي سيليكات، وهي أساسًا ليست إلا الرمل العادي، وإذا حفزت السيلكيات بطريقة سليمة

فإن الكهرباء ستمر من خلالها، لكنها لن تمر بدون تحفيز. تقطع البلورات الطويلة من السيليكات بمقطع ١٠ سم إلى شرائح رقيقة كالشفرات مكونة مئات الشيبات الصغيرة المستطيلة، بحيث تكون كل واحدة منها أصغر من رأس عود الثقاب، وتضغط طبقات متتالية من الدوائر الإلكترونية الدقيقة، الكثيفة والمعقدة، فوق الشيب مثل الحلوى اليونانية الرقيقة، والمكونة من الترانزستورات المكافئة والديودات والدوائر المتكاملة. والشيب الواحدة فعليًّا حاسوب كامل، وتعني كل العمليات الباقية في ميكرو حاسوب حديث بإدخال وإخراج المعلومات إلى ومن الشيب. وهي رخيصة للغاية في تصنيعها (بمجرد إنفاق التكاليف الخاصة بتصميم الدوائر وضبط الآلات لإعادة إنتاجها) بحيث يمكن إنتاجها بالمئات، واختبارها والتخلص من تلك التي لا تعمل بإلقائها بعيدًا. فتكلفة صناعة شيب واحدة، بدءًا من الصفر قد تصل إلى مليون دولار، أما صنع أكبر عدد من الشيبات مثل الشيب الأولى فلا تتكلف فيه الشيب الواحدة أكثر من بضعة بنسات.

وهناك القليل من الأشياء في حياتنا اليومية الذي يمكن وضعه على باب الكوانتم. فقد أعطتنا الوصفات من فصل واحد من كتاب الطهي الخاص بالكوانتم الساعات الرقمية، والحواسيب المنزلية، والأدمغة الإلكترونية التي تتحكم في مكوك الفضاء في مداره (وأحيانا تقرر ألا تدعه يطير، مهما قاله المديرون البشر)، والتلفزيون النقال، والأنظمة الستريو الشخصية والهاي فاي (hi-fi) القوية التي يمكن أن تصيبك بالصمم، وأجهزة مساعدة لتعويض الصمم الناتج عن فقد السمع. وليست الحواسيب المحمولة (في حجم الجيب) الحقيقية ببعيدة المنال، وكذلك الآلات الذكية الأصلية التي مازالت بعيدة، لكنها واقعية وممكنة. أما الحواسيب التي تتحكم في أجهزة الهبوط على المريخ ومجسات «فويجر» المتجهة إلى الجزء الخارجي من المجموعة الشمسية، فهي أول أبناء عمومة للشيبات التي تتحكم في رواق الألعاب، وكلها تضرب بجذورها في السلوك الغريب للإلكترونات وفقًا للقواعد الأساسية للكوانتم، وحتى قصة الميكرو الجبار، مع ذلك، لا تستنفذ كل ما تعد به فيزياء الحالة الجامدة.

الموصلات الفائقة

للموصلات الفائقة اسم منطقي مثل أشباه الموصلات؛ فالموصل الفائق مادة توصل الكهرباء بدون أي مقاومة ظاهرية على الإطلاق، وهذا الأمر يجعلنا أقرب ما نكون على الأرجح للحصول على الحركة الأبدية — وليس في الأمر أننا نحصل على شيء مقابل لا شيء لكنه مثال نادر للحصول على كل شيء تدفعه في الفيزياء — دون اختصار أو نقص، ويمكن تفسيره بحدوث تغير يجعل أزواجًا من الإلكترونات تترافق وتتحرك معًا. ومع أن كل إلكترون يملك سبين نصف عدد صحيح، وبذلك يخضع لإحصاء فيرمي-ديراك ولمبدأ الاستثناء. إلا أن زوجًا من الإلكترونات يمكن أن يسلك تحت بعض الظروف مثل جسيمة مفردة لها سبين عدد صحيح، ومثل هذه الجسيمة لا تكره على الخضوع لقاعدة الاستثناء، وتخضع لإحصاء بوز-أينشتاين نفسه الذي يصف سلوك الفوتونات بمصطلحات ميكانيكا الكم.

اكتشف الفيزيائي الهولندي كامرلينج أونيس Kamerlingh Onnes التوصيل الفائق سنة ١٩١١، عندما وجد أن الزئبق فقد كل مقاومته الكهربية تحت درجة حرارة ٤,٢ درجة بالمقياس المطلق لدرجة الحرارة (٤,٢ درجة كلفين أو -٢٦٩ درجة سيلزيوس). حصل أونيس على جائزة نوبل على أبحاثه في درجة الحرارة المنخفضة سنة ١٩١٣، إلا أن ذلك كان من أجل بحث آخر، وهو تحضير سائل الهليوم، ولم تفسر ظاهرة التوصيل الفائق بصورة مقنعة إلا سنة ١٩٥٧ عندما جاء جون باردين John Bardeen وليون كوبر Leon Cooper وروبرت شرايفر Robert Schrieffer بنظرية جلبت لهم جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٧٢.*

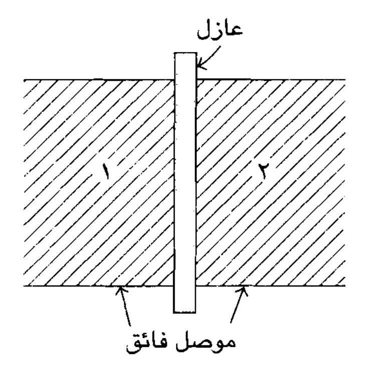
يعتمد التفسير على الطريقة التي تتداخل بها الإلكترونات المزدوجة مع الذرات في الشبكة البلورية؛ يتداخل أحد الإلكترونات مع البلورة، ونتيجة لذلك التداخل يتعدل تداخل البلورة مع الإلكترون الآخر في الازدواج. وهكذا

* كان باردين قد أصبح مشهورًا منذ سنة ١٩٤٨ عن أبحاثه مع وليام شوكلي William Shockely ووالتر براتين Walter Brattain حول اختراع جلب لثلاثتهم جائزة نوبل لسنة ١٩٥٦. كان هذا الاختراع الصغير هو الترانزستور، وأصبح باردين أول من يحصل على جائزة نوبل مرتين في الفيزياء.

وعلى الرغم من الميل الطبيعي للتنافر مع بعضهما، فإن زوج الإلكترونات يكون ارتباطًا ضعيفًا فيما بنيهما، هذا الارتباط كاف ليتسبب في التغير من إحصاء فيرمي-ديراك إلى إحصاء بوز-أينشتاين. ولا تستطيع كل المواد أن تصبح موصلات فائقة، وحتى المواد التي تستطيع ذلك يؤدي أي اضطراب من الاهتزازات الحرارية للذرات في البلورة إلى كسر ازدواج الإلكترونات، المسئول عن حدوث الظاهرة فقط في درجات الحرارة المنخفضة في المدى من ١ إلى ١٠ درجة كلفين. وتصبح بعض المواد موصلات فائقة تحت درجات حرارة حرجة تختلف من مادة لأخرى، لكنها واحدة للمادة نفسها، وفوق هذه الدرجة ينكسر ازدواج الإلكترونات وتصبح المادة ذات صفات كهربية عادية.

وتتأكد النظرية بحقيقة أن المواد جيدة التوصيل في درجة حرارة الغرفة ليست هي أفضل الموصلات الفائقة؛ فالموصلات «العادية» الجيدة تسمح للإلكترونات بحرية الحركة بالضبط لأنها لا تتداخل مع ذرات الشبكة البلورية؛ لأنه بدون تداخل بين الإلكترونات والذرات لا توجد طريقة لتكون ازدواجيات الإلكترونات التي تؤدي إلى التوصيل الفائق الفعال في درجات الحرارة المنخفضة.

ولسوء الحظ فإن الموصلات الفائقة لا بد من تبريدها قبل أن تصبح كذلك، لأن الاستخدامات المتوقعة للموصلات الفائقة من السهل تخيلها، ونقل القوى عبر الكابلات دون أي فقد في الطاقة يمثل أوضح مثال على ذلك. وتقوم الموصلات الفائقة بأشياء غريبة أخرى. يتمكن المجال المغناطيسي من اختراق الفلزات ذات التوصيل العادي، أما الموصل الفائق فيحدث تيارات كهربية على سطحه تتنافر مع المجال المغناطيسي وتلفظه — الحاجز المثالي ضد التداخلات غير المرغوب فيها من المجالات المغناطيسية — لكنها غير عملية مادام أنه لا بد من تبريد الحاجز إلى بضع درجات كلفينية. عندما يفصل عازل بين موصلين فائقين، فإنك قد تتوقع ألا يمر التيار بينهما، لكن عليك أن تتذكر أن الإلكترون يخضع لقواعد الكوانتم نفسها التي تسمح للجسيمات أن تخترق أنفاقًا خارجة من النواة فإذا كان العازل الحاجز

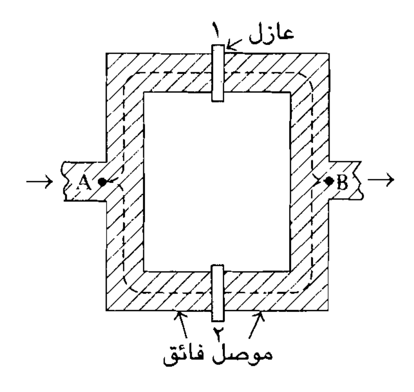


شكل ٧-٢: تحدث أشياء غريبة عند وصلة جوزيفسون، عندما يفصل عازل بين قطعتي موصل فائق، وتستطيع الإلكترونات تحت ظروف مواتية أن تخترق نفقًا خلال الحاجز.

رقيقًا بما فيه الكفاية، فإن احتمال عبور أزواج الإلكترونات للفجوة يصبح كبيرًا لكنها لا تعطي نتائج مقبولة، ولا تنتج مثل هذه الوصلات (التي تسمى وصلات جوزيفسون Josephson) تيارًا كهربيًّا إذا طبقنا فرق جهد عبر الحاجز، لكن يوجد تيار كهربي إذا كان الجهد من جانب لآخر مساويًا للصفر.

وإذا جمع ازدواج من وصلة جوزيفسون بأخذ قطعتين من الموصل الفائق كل منهما على شكل شوكة رنانة وضغطناهما معًا بحيث تلتصق نهاياتهما ويفصل بنيهما طبقة من عازل في شكل ساندوتش، فإنه — أي الازدواج — سيحاكي سلوك الإلكترون في تجربة «الشق المزدوج» وفقًا لميكانيكا الكم، وسنناقش هذه التجربة في الفصل القادم، وهي التجربة التي تمثل حجر الزاوية لبعض السمات الغريبة في عالم الكوانتم.

ولا تستطيع الإلكترونات أن تتصل ببعضها لتصنع بوزونات زائفة تتحدى قوانين الفيزياء العادية في درجات الحرارة المنخفضة فقط، لكن تستطيع ذرات الهليوم القيام بعمل بارع مماثل، وهذا هو أساس خاصية للهليوم السائل تسمى السيولة الفائقة؛ عندما تحرك فنجان القهوة ثم تتركه



شكل ٧-٣: زوج من وصلات جوزيفسون يمكن أن ينتظم لصنع منظومة شبيهة بتجربة الشقين المستطيلين للضوء. وفي هذا التصميم يمكن مشاهدة التداخل بين الإلكترونات، واحد من مؤشرات كثيرة للطبيعة الموجية لهذه «الجسيمات».

لحاله، تتباطأ حركة الدوامة في السائل ثم تتوقف نظرًا لوجود قوى اللزوجة التي تكافئ الاحتكاك في السوائل، حاول الشيء نفسه مع الهليوم المبرد تحت ٢,١٧ درجة كلفين ولن يتوقف الدوران أبدًا حتى لو تركته تمامًا لحاله، وقد يتسلق السائل جوانب الوعاء إلى أعلى ويعبر حافة الإناء، وبدلًا من صعوبة المرور التي تزداد مع ضيق الأنبوبة، فإن الهليوم فائق السيولة ينساب بسهولة أكثر إذا زادت الأنبوبة التي يمر خلالها ضيقًا، ويمكن تفسير كل هذا السلوك الغريب بمصطلحات إحصاء بوز-أينشتاين. ومرة أخرى ومع أن درجة الحرارة المنخفضة تجعل الاستخدامات العملية للظاهرة صعبة، فإن سلوك الذرات عند هذه الدرجات المنخفضة يماثل سلوك الإلكترونات في الموصلات الفائقة في أنه يقدم الفرصة لرؤية العمليات الكمية وهي تعمل. فإذا وضع قليل من الهليوم فائق السيولة في إناء صغير عرضه ٢مم تقريبًا، وأخذ الإناء في الدوران، فإن الهليوم سيظل ساكنًا في البداية، وعندما تزداد سرعة الدوران، وعند قيمة حرجة من الزخم الزاوي يطور الهليوم كله سريانًا زاويًا، ويتغير من حالة كمية إلى أخرى. ولا توجد حالة

بينية — تقابل زخمًا زاويًا بينيًا — مسموح بها تبعًا لقواعد الكم، ويمكن رؤية كل تجمع ذرات الهليوم، وهو كتلة مرئية أكبر كثيرًا من ذرة مفردة أو الجسيمات في عالم الكم، وهي تسلك وفقًا لقواعد الكم. وكما سنرى بعد ذلك، يمكن تطبيق التوصيل الفائق على أجسام ذات مقاييس بشرية، وليست ذرية. وليست نظرية الكم محدودة بعالم الفيزياء، ولا حتى العلوم الفيزيائية؛ فكل الكيمياء لو تتذكر قد أصبحت الآن مفهومة بمصطلحات القواعد الأساسية للكم، والكيمياء علم الجزيئات، وليس بالأحرى علم الذرات المنفردة أو الوحدات تحت الذرية، ويتضمن ذلك أكثر الجزيئات أهمية لنا جميعًا — الجزيئات الحية، بما في ذلك جزيء الحياة دنا DNA، ويتعمق فهمنا للحياة ذاتها بقوة في الوقت الحاضر في نظرية الكم.

الحياة ذاتها

بعيدًا عن الأهمية العلمية لنظرية الكم من أجل فهم كيمياء الحياة، فإن هناك ارتباطًا شخصيًّا مباشرًا بين بعض الشخصيات في قصة الكم واكتشاف بنية الحلزون المزدوج للدنا DNA، جزيء الحياة؛ اكْتُشِفَ القوانين التي تصف حيود أشعة X من البلورات بواسطة لورانس براج Lawrence Bragg ووالده وليم أثناء عملهما في كافندش في السنوات التي سبقت الحرب العالمية الأولى، وقد حصلا مناصفة على جائزة نوبل عن هذا العمل، وكان لورانس في سن مبكرة (سنة ١٩١٥ عندما كان ضابطًا عاملًا في فرنسا) وظل على قيد الحياة (دون النظر إلى أنه خدم في فرنسا أثناء الحرب العالمية الأولى) ليحتفل باليوبيل الذهبي لهذه المناسبة بعد خمسين سنة. *وقد كون براج الأب سمعته في البداية في الفيزياء بدراساته* لأشعة ألفا وبيتا وجاما، وقد أثبت أن أشعة جاما وأشعة X تسلك مثل الجسيمات من بعض النواحي، وذلك في أواخر العقد الأول من القرن العشرين. يعتمد قانون براج لحيود أشعة X — الذي هو مفتاح فك أسرار بنية البلورات — على خصائص موجات أشعة X التي ترتد عن الذرات في البلورة، وتعتمد أنساق التداخل الناتجة على المسافات البينية

بين الذرات في البلورة وعلى أطوال موجات أشعة X، وقد تطورت هذه التقنية في أيد خبيرة لتحدد مواقع الذرات المنفردة حتى في البنى المعقدة للبلورات.

جاءت البصيرة التي أفضت إلى قانون براج سنة ١٩١٢ أساسًا من لورانس براج، الذي شغل منصب أستاذ الفيزياء بكافندش في كمبريدج (خلفًا لرذرفورد الذي توفي سنة ١٩٣٧) ومازال يعمل بنشاط في مجال أشعة X، ضمن أشياء أخرى كثيرة. وقد كانت بداية التقدم في العلم الجديد «الفيزياء الحيوية» خلال هذا العقد. وقد أدت الأبحاث الرائدة ج. د. برنال J. D. Bernal في تعيين بنية وتركيب الجزيئات البيولوجية بواسطة حيود أشعة X، إلى الدراسات التفصيلية لجزيئات البروتين المعقدة التي تقوم بالكثير من وظائف الحياة. وقد اقتسم الباحثان ماكس بيروتز Max Perutz وجون كندرو John Kendrew جائزة نوبل في الكيمياء لسنة ١٩٦٢ على تعيينهم لبنى الهيموجلوبين (الجزيء الذي ينقل الأكسجين في الدم) والميوجلوبين (بروتين العضلات) نتيجة الأبحاث التي بدأت في كمبردج قبل الحرب العالمية الثانية.

ارتبطت إلى الأبد في الأسطورة الشهيرة أسماء «الشبان» فرانسيس كريك وجيمس واطسون بنشأة البيولوجيا الجزيئية، وهما اللذان طورا نموذج الحلزون المزدوج للدنا DNA في بداية خمسينيات القرن العشرين، وحصلا على جائزة نوبل في «الفسيولوجيا أو الطب» (بمشاركة موريس ويلكينس) أيضا في عام ١٩٦٢.

وفيما يدعو للإعجاب المرونة التي أبدتها لجنة نوبل في معالجة توزيع الشرف على الرواد المختلفين في مجال الفيزياء الحيوية، وذلك بمنح الجوائز في السنة نفسها تحت عنوان «الكيمياء» و«الفسيولوجيا»، لكن لسوء الحظ أن القواعد الصارمة التي لا تسمح بمنح الجائزة بعد الموت قد منعتهم من منح قسم من جائزة كريك-واطسون-ويلكينس إلى زميلة ويلكينس روزالين فرانكلين، التي أجرت الكثير من الأعمال الهامة المتعلقة بعلم البلورات والتي كشفت عن بنية الدنا DNA، إلا أنها توفيت سنة ١٩٥٨ وهي في السابعة

والثلاثين من عمرها، وقد شغلت فرانكلين موقع الأنثى نافثة اللهب في كتاب واطسون «الحلزون المزدوج»، وهو تاريخ شخصي رائع للفترة التي قضاها في كمبريدج، وهو مسلٍّ بشكل كبير لكنه بعيد عن الحق والدقة في الصورة التي رسمها لزملائه وحتى لنفسه.

جرت الأبحاث التي أدت بواطسون وكريك إلى بنية الدنا في كافندش، حيث كان براج مازال في السلطة. ويصف واطسون، الشاب الأمريكي الموجود في أوربا في مهمة علمية بعد الدكتوراه، في كتابه كيف واجه لأول مرة براج عندما كان يبحث عن تصريح ليعمل في كافندش، فاجأ الشخص ذو الشارب الأبيض، الذي كان في ذلك الوقت في بداية الستينات، واطسون الشاب كأثر من الماضي العلمي، ولا شك أنه كان الآن يمضي معظم أيامه جالسًا في نوادي لندن. حصل واطسون على التصريح واندهش باهتمام براج النشط بالبحث، الذي قدم إرشادات لا تقدر بثمن، مع أنها لم تكن محل ترحيب دائمًا، في طريق حل مشكلة الدنا DNA. أما فرانسيس كريك فمع أنه كان أكبر سنًّا من واطسون لكنه كان فنيًّا مازال طالبًا يعمل على رسالته لدرجة الدكتوراه، ومثل كثيرين آخرين من جيله كان تاريخه العلمي قد انقطع في الحرب العالمية الثانية، مع أن ذلك قد لا يكون شيئًا سيئًا في حالته، وقد تلقى تدريبه في الأصل كفيزيائي، ولم يتحول إلى العلوم البيولوجية إلا في نهاية أربعينيات القرن العشرين وهو القرار الذي جاء نتيجة الحماس الشديد الذي أحدثه كتاب صغير كتبه شرودنجر ونشر سنة ١٩٤٤؛ كان عنوان الكتاب «ما الحياة؟» وهو كتاب كلاسيكي — مازال يطبع ويستحق أن تبحث عنه — يبسط فكرة أن فهم الجزيئات الأساسية للحياة يمكن بمصطلحات قوانين الفيزياء، وأهم الجزيئات التي تشرح بواسطة هذه المصطلحات هي الجينات التي تحمل المعلومات عن كيفية بناء الجسم الحي وكيفية عمله. وعندما كتب شرودنجر «ما الحياة؟» كان من المعتقد أن الجينات، مثلها مثل جزيئات حية أخرى كثيرة، مصنوعة من البروتين، وفي حدود هذا الوقت كان يجري اكتشاف أن الميزات الوراثية تنتقل بواسطة جزيئات حمض اسمه الحمض النووي الريبوزي منقوص الأكسجين (deoxyribonucleic acid)

والموجود في النواة المركزية للخلايا الحية.* وهو الحمض دنا DNA. وكانت بنية الدنا هي التي عينها كريك وواطسون مستخدمين بيانات أشعة X التي حصل عليها ويلكينس وفرانكلين. وقد قمت بوصف البنية التفصيلية للدنا ودوره في العمليات الحياتية في كتاب آخر.† والسمة الأساسية هي أن الدنا جزيء مزدوج، مصنوع من جديلتين ملتفتين حول بعضهما، ويحمل الترتيب الذي تنتظم به المركبات الكيميائية — المسماة قواعد — في سلسلة دنا DNA حول محورها المركزي، المعلومات التي تستخدمها الخلايا الحية لبناء جزيئات البروتين التي تقوم بكل العمل، مثل حمل الأكسجين في الدم أو جعل العضلات تؤدي عملها. ويمكن أن تحل جديلة من دنا DNA جزئيًا لتجعل سلسلة القواعد تعمل «كقالب» لبناء الجزيئات الأخرى، كما يمكنها أن تنحل تمامًا وتكرر نفسها بمواءمة كل قاعدة على طول سلسلة الجديلة مع الجزء الذي يقابلها بحيث تبني جديلة صورة مرآة من ذاتها مكونة بذلك حلزونًا مزدوجًا جديدًا. وتستخدم العمليتان مواد خام هي الحساء الكيميائي داخل الخلايا الحية، وكلا العمليتين أساسيتان للحياة. والجنس البشري قادر اليوم على إصلاح الرسائل المشفرة على طول دنا والتدخل في التعليمات المشفرة في مخطط الحياة على الأقل في حالة بعض الكائنات البسيطة نسبيًّا.

وهذا هو الأساس في الهندسة الوراثية؛ فمن الممكن تخليق قطع من المادة الوراثية (دنا) بواسطة تضافر التقنيات الكيمائية والبيولوجية، ومن الممكن تحفيز الكائنات الدقيقة مثل البكتريا لأخذ هذا الدنا من الحساء الكيميائي في الوسط المحيط وإدخاله في الشفرة الجينية الخاصة بها، فإذا أعطيت المعلومات المشفرة عن كيفية صنع الأنسولين البشري لفصيلة من البكتريا بهذه الطريقة، فإن مصانعها البيولوجية ستقوم بذلك بالضبط، وتنتج المادة المطلوبة تمامًا لمرضى السكر لتمكنهم من الحياة بصورة

* كان استخدام المصطلح نفسه في الأصل للتعبير عن الجزء المركزي في الذرة صدى متعمدًا للمصطلح البيولوجي الذي كان موجودًا بالفعل.

† لغز القرد، بالاشتراك مع جيرمي تشيرفاس Jermy Cherfas.

طبيعية. وحلم التدخل وتغيير المادة الوراثية البشرية للتخلص من العيوب التي تتسبب في المشاكل مثل مرض السكر في المقام الأول، مازال بعيدًا، إلا أنه لا يوجد سبب نظري يمنع التوصل إليه، غير أن الخطوة الأقرب ستكون هي استخدام تقنية الهندسة الوراثية في الحيوانات والنباتات الأخرى لإنتاج فصائل متفوقة من أجل الطعام والمتطلبات البشرية الأخرى.

ومرة أخرى، يمكن إيجاد التفاصيل في مكان آخر.* ولعل النقطة الهامة هي أن الجميع قد سمع بالهندسة الوراثية وقرأ عن التوقعات الإعجازية — والأخطار — التي تعد بها في المستقبل، ويعترف قليل جدًّا من الناس، مع ذلك، بأن فهم الجزيئات الحية التي تجعل من الهندسة الوراثية شيئًا ممكنًا يعتمد على فهمنا الحالي لميكانيكا الكم، التي بدونها لا يمكن لنا أن نفسر بيانات حيود أشعة X، عدا أي شيء آخر. وحتى نفهم كيف نبني أو نعيد بناء الجينات، علينا أن نفهم لماذا وكيف تتحد الذرات مع بعضها في ترتيب معين فقط، وعلى مسافات محددة من بعضها وبواسطة أربطة كيميائية لها قوة معينة، وهذا الفهم هو هدية الفيزياء الكمية للكيمياء وللبيولوجيا الجزيئية.

لقد عالجت هذه النقطة بتفصيل أكثر مما لو كنت قد فعلت لعضو في كلية جامعية في ويلز، وقد أشرت في مقال شامل في نيوساينتست New Scientist صدر في مارس/آذار ١٩٨٣، في عجالة أنه «بدون نظرية الكم ما كان يمكن أن توجد الهندسة الوراثية، ولا حواسيب الحالة الجامدة، ولا محطات القوى النووية (أو القنابل).» وقد أثار ذلك حفيظة أحد المراسلين في هذا المعهد الأكاديمي الموقر إلى الحد الذي جعله ضجرًا برؤية الهندسة الوراثية تُجَر إلى كل مكان كالكلمة العلمية الجديدة، ويجب ألا يسمح لجون جريبين أن يذهب طليقًا بمثل هذه الملاحظات المفرطة في الخيال. فما الارتباط الممكن، حتى لو كان خياليًّا، بين نظرية الكم والوراثة؟ وإنني أود أن يكون الارتباط واضحًا هذه المرة. فمن جهة، من المثير الممتع أن

* الحياة من صنع الإنسان Man made life تأليف جيريمي تشيرفاس Jeremy Cherfas.

نستطيع الإشارة إلى حقيقة تحول كريك نحو الفيزياء الحيوية بفضل تحفيز شرودنجر، وأن البحث الذي أدى إلى اكتشاف الدنا DNA الحلزون المزدوج قد جرى تحت الإشراف الرسمي للورانس براج، حتى وإن لم يكن ذلك محل ترحيب أحيانًا، ومن جهة أخرى أعمق كان السبب وراء اهتمام الرواد مثل براج وشرودنجر والجيل التالي لهم مثل كندرو وبيروتس وويلكينس وفرانكلين بالمشاكل البيولوجية هو بالطبع أن هذه المشاكل ببساطة نوع آخر من الفيزياء — كما أشار شرودنجر — وهو النوع الذي يتعامل مع تجمع أعداد كبيرة من الذرات في جزيئات معقدة.

وبعيدًا عن التراجع عن هذا التعليق العابر الذي قلته في نيو ساينتست فإنني أود أن أقوي منها: إذا سألت شخصًا ذكيًّا ومطلعًا لكنه ليس علميًّا أن يلخص أهم المساهمات العلمية في حياتنا الحالية، وأن يسرد فوائد ومخاطر التقدم العلمي في المستقبل القريب، فإنك ستحصل بالتأكيد على قائمة تضم تكنولوجيا الحاسوب (الأتمتة، والبطالة والتسلية والروبوتات) والطاقة النووية (القنبلة والصواريخ ومحطات القوى، وثرى مايل آيلاند) والهندسة الوراثية (أدوية جديدة واستنساخ ورعب الأمراض التي من صنع الإنسان وفصائل المحاصيل المحسنة) والليزر (الهولوجرافيا، وأشعة الموت والجراحة الدقيقة الميكروية والاتصالات). وربما تكون الأغلبية العظمى من الناس الذين سئلوا قد سمعوا بالنظرية النسبية، التي لا تلعب أي دور في حياتهم اليومية، ولا يكاد يوقن أي واحد منهم أن كل اسم في هذه القائمة له جذوره في ميكانيكا الكم، وهو فرع العلوم الذي ربما لم يسمع به أحدهم، وبالتأكيد ربما لم يفهمه.

وهم ليسوا وحدهم، فقد جرى التوصل لكل هذه الإنجازات عن طريق فن الطهي الكمي، باستخدام القواعد التي يبدو أنها تعمل مع أن أحدًا لا يفهم لماذا تعمل. ومع الإنجازات التي حدثت خلال العقود الستة الماضية، فمن المشكوك فيه ما إذا كان أي أحد يفهم «لماذا» يعمل فن الطهي الكمي. وسنكرس البقية من هذا الكتاب لسبر غور بعض الأسرار الأعمق التي عادة ما تجرف تحت البساط، وللنظر في بعض الإمكانات والتناقضات.



الباب الثالث

... وما بعد

«من الأفضل أن نتجادل حول مشكلة ما دون التوصل إلى حل لها من أن نتوصل إلى الحل دون أن نتجادل حولها.»

جوزيف جوبرت ١٧٤٥-١٨٢٤

الفصل الثامن

الفرصة وعدم التيقن

يُرى اليوم مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج كسمة محورية — وربما السمة المحورية — لنظرية الكم، لكنه ظل لأكثر من عشر سنوات قبل أن يتقبله أقران هايزنبرج، وربما لم يُعترف به بشكل ما إلا منذ الثلاثينيات من القرن العشرين.

ازداد استيعاب هذا المفهوم منذ زيارة شرودنجر إلى كوبنهاجن في سبتمبر/أيلول ١٩٢٦، وكانت المناسبة هي تعليقه الشهير عن بور حول «وثب الكم الملعون». تيقن هايزنبرج أن أحد الأسباب الرئيسية لما يبدو من تطاحن بين بور وشرودنجر هو تضارب المفاهيم فأفكار مثل «الوضع» و«السرعة» (أو سبين (الحركة المغزلية) فيما بعد) لا تعني ببساطة في عالم الفيزياء الميكروية مثل ما تعنيه في الحياة اليومة، فماذا تعنى تلك الأفكار، وكيف يمكن ربط هذين العالمين بعضهما ببعض؟ استرجع هايزنبرج المعادلة الأساسية لميكانيكا الكم:

$$pq - qp = \hbar / i.$$

وتبين من هذه المعادلة أن ناتج عدم التيقن في الوضع (Δq) وكمية الحركة (Δp) لا بد أن يكون دائمًا أكبر من $\hbar$، وتطبق القاعدة نفسها لعدم التيقن لكل ما يطلق عليه المتغيرات المترافقة التي حاصل ضربها يساوي وحدات الفعل، مثل $\hbar$، ووحدات الفعل هنا هي الطاقة × الزمن، أما الزوج الهام الآخر من مثل هذه المتغيرات فهو من المؤكد الطاقة (E) والزمن (t). وقال هايزنبرج إن المفاهيم الكلاسيكية لعالمنا اليومي مازالت

موجودة في العالم الميكروي، ولكن من الممكن تطبيقها فقط بشكل محدود تبينه علاقات عدم التيقن، فكلما كانت معرفتنا لموقع جسيمة أكثر دقة أصبحت معرفتنا لكمية الحركة أقل والعكس صحيح.

معنى عدم التيقن

نشرت هذه النتائج المذهلة في مجلة الفيزياء سنة ١٩٢٧، فاستقبلها العلماء النظريون مثل ديراك وبور، الملمون بالمعادلات الجديدة لميكانيكا الكم، باستحسان على الفور، لكن معظم التجريبيين رأى نتائج هايزنبرج تحديًا لمهاراتهم، وتخيلوا أنه يدَّعي أن تجاربهم ليست جيدة بما فيه الكفاية لقياس الوضع وكمية الحركة في الوقت نفسه، وحاولوا القيام بتجارب لإثبات خطئه، إلا أن ذلك كان هدفًا غير ذي جدوى لأن هايزنبرج لم يدَّعِ ذلك على الإطلاق.

ويظهر أن سوء الفهم هذا، الذي لا يزال مستمرًّا حتى هذه الأيام، سببه ولو جزئيًّا، الطريقة التي غالبًا تدرس بها فكرة عدم التيقن، وقد استخدم هايزنبرج نفسه فكرة ملاحظة الإلكترون للوصول إلى مبدئه، إننا نستطيع أن نرى الأشياء عندما ننظر إليها، وهو الأمر الذي يتضمن ارتداد فوتونات الضوء منها إلى أعيننا، والفوتون لا يؤثر كثيرًا على شيء مثل بيت، ولذا لن نتوقع أن البيت سيتأثر كثيرًا عندما ننظر إليه. ولكن أمر الإلكترون يختلف كثيرًا؛ فبداية وحيث إن الإلكترون صغير جدًّا فلا بد أن نستخدم طاقة كهرومغناطيسية ذات طول موجة متغير حتى يمكن رؤيته على الإطلاق (بمساعدة أجهزة القياس)، وأشعة الطاقة هذه طاقتها كبيرة، وأي فوتونات لأشعة جاما ترتد عن الإلكترون — ويمكن التعرف عليها بأجهزة القياس — ستغير بطريقة درامية موقع وكمية حركة الإلكترون — إذا كان الإلكترون في ذرة ما — ومجرد فعل الرؤية نفسه بواسطة ميكروسكوب خاص بأشعة جاما ربما يدفع هذا الإلكترون خارج الذرة كليًّا، وكل ذلك حقيقي بما فيه الكفاية ويعطي فكرة عامة عن استحالة قياس الوضع

وكمية الحركة للإلكترون معًا بدقة. لكن مبدأ عدم التيقن، ووفقًا للمعادلات الأساسية لميكانيكا الكم، يدلنا أنه لا يمكن أن يكون للإلكترون كمية حركة دقيقة وموقع دقيق في الوقت نفسه.

كان لهذه النتائج تضمينات بعيدة المدى، وكما قال هايزنبرج في نهاية مقاله في مجلة الفيزياء: «إننا لا نستطيع أن نعرف الحاضر بكل تفاصيله كمسألة مبدأ.» وهنا حيث تتحرر نظرية الكم من تحديدية الأفكار الكلاسيكية، وبالرجوع إلى نيوتن فإنه من الممكن التنبؤ بكل ما سيحدث في المستقبل إذا عرفنا موقع وكمية حركة كل جسيمة في الكون، أما الفيزيائيون المحدثون فإن فكرة هذا التنبؤ المثالي لا معنى لها حيث إننا لا نستطيع أن نعرف الموقع وكمية الحركة حتى لجسيمة واحدة بالضبط، ونحصل على النتيجة نفسها من كل النسخ المختلفة للمعادلات من الميكانيكا الموجية ومصفوفات هايزنبرج-بورن-جوردان وأعداد q لديراك، هذا مع أن مسلك ديراك الذي تجنب بعناية أي مقارنة فيزيائية لعالم الحياة اليومية كان يبدو وكأنه الأكثر ملاءمة. ومن المؤكد أن ديراك قد توصل تقريبًا إلى علاقة عدم التيقن قبل هايزنبرج، وقد أشار في مقال صدر ضمن أعمال الجمعية الملكية في ديسمبر/كانون الأول ١٩٢٦ أنه قد يتوقع المرء مع ذلك أن تجيب نظرية الكم على أي أسئلة تشير إلى القيم العددية لكل من p وq، إلا أنه لكي تجيب على الأسئلة التي تحتوي فقط q وp فإنها لا بد أن تعطي قيما عددية.

لم يستخدم العلماء تضمينات هذه الأفكار في مبدأ السببية إلا في الثلاثينيات من القرن العشرين — وهو فكرة أن كل حدث وراءه بعض الأحداث المعينة — ولاستخدامها في حل لغز التنبؤ بالمستقبل أيضًا، وفي الوقت نفسه، ومع أن علاقات عدم التيقن قد جرى استنتاجها من المعادلات الأساسية لميكانيكا الكم فإن بعض الخبراء المؤثرين قد أخذوا يدرسون نظرية الكم بادئين بعلاقات عدم التيقن، ويعتبر وولف جانج باولي على الأرجح المؤثر المحوري في هذا الاتجاه، وقد كتب مقالًا أساسيًّا حول نظرية الكم بادئًا بعلاقات عدم التيقن، وشجع زميله هيرمان فيل ليستهل كتابه

«نظرية المجاميع وميكانيكا الكم» بالطريقة نفسها. ظهر هذا الكتاب لأول مرة باللغة الألمانية سنة ١٩٢٨ ثم بالإنجليزية بواسطة ميثون سنة ١٩٣١. ولقد صاغ هذا الكتاب ومقال باولي المناخ لجيل من المراجع القياسية في هذا المعنى، وأصبح الطلاب الذين شبوا على هذه المراجع أحيانًا أساتذة بدورهم، ولقنوا تلك التعاليم للأجيال التالية، ونتيجة لذلك صار الطلاب في الجامعات حتى يومنا هذا يتعلمون نظرية الكم في أغلب الأحيان عن طريق علاقات عدم التيقن.*

وهذا حدث غريب في التاريخ، وعلى كل فإن المعادلات الأساسية لنظرية الكم تؤدي إلى علاقات عدم التيقن، ولكن إذا بدأنا بعدم التيقن فلن نصل بأي حال من الأحوال إلى المعادلات الأساسية للكم، والأسوأ من ذلك فإن الطريقة الوحيدة لتقديم عدم التيقن بدون المعادلات تكون باستخدام أمثلة مثل استخدام ميكروسكوب أشعة جاما لمشاهدة الإلكترونات. ويجعل هذا الناس تفكر لحظيًا أن عدم التيقن يختص بالتحديدات التجريبية ولا يختص بالحقيقة الأساسية عن طبيعة الكون، وعليك أن تعرف أمرًا واحدًا ومنه تعود لتعرف شيئًا آخر ثم تتحرك لتكتشف فقط أنك قد توصلت إلى ما تعلمته في البداية؛ فالعلم ليس بالضرورة منطقيًا وبالمثل مدرسو العلوم، والنتيجة هي توالد أجيال من الطلاب المشوشين وسوء فهم لمبدأ عدم التيقن، سوء الفهم هذا الذي لا تشارك أنت فيه، لأنك قد اكتشفت أمورًا في ترتيبها الصحيح. وعلى كل إذا لم نهتم بالتعقيدات العلمية ونود أن نقبض بأسناننا على غرائب عالم الكم فإنه من المعقول جدًّا أن نبدأ باكتشاف هذا العالم بالأمثلة المذهلة حول طبيعته الشاذة، وسيكون مبدأ عدم التيقن في الجزء المتبقي من هذا الكتاب، فقط عن أقل الأشياء غرابة من التي ستصادفنا.

* ومع ذلك فإن هذا يصنع مصادفة مبهجة، ووفقًا لهذه الطريقة في معالجة نظرية الكم، فإن أهم الأشياء هي p's وq's لعلاقات عدم التيقن. فكل فرد يعرف التعريف القديم «خذ في اعتبارك p's و q's» التي تعني «احترس» ويجيء هذا التعبير على الأرجح من تحذير الأطفال الذين يتعلمون الأبجدية، أو من تحذير عمال الطباعة المبتدئين الذين يتعاملون مع الحروف المتحركة، ليحترسوا من الأشياء الصغيرة في أطراف هذه الحروف (قاموس بريور للعبارة والخرافة، كاسيل، لندن، سنة ١٩٨١)، إلا أنها من الممكن اتخاذها كشعار لنظرية الكم. وإلى حد علمي، فإن اختيار هذه الحروف في معادلات الكم لم يكن بأي حال أكثر من مصادفة.

تفسير كوبنهاجن

الأمر المهم المتعلق بمبدأ عدم التيقن، الذي لا يلقى الاهتمام الذي يستحقه هو أن هذا المبدأ لا يعمل بالكيفية نفسها للأمام أو للخلف في الزمن. «تهتم» أشياء قليلة جدًّا في الفيزياء بالكيفية التي ينساب بها الزمن، وأن هذا أحد الألغاز الأساسية للكون الذي نعيش فيه، حيث إنه من المؤكد وجود «سهم للزمن» محدد، الذي يميز بين الماضي والمستقبل. وتدلنا علاقات عدم التيقن أننا لا نستطيع معرفة الموقع وكمية الحركة في الوقت نفسه، وعليه فإننا لا نستطيع التنبؤ بالمستقبل؛ فالمستقبل ليس قابلًا أصلًا للتنبؤ وهو غير مؤكد. ولكنه في داخل نطاق قواعد ميكانيكا الكم من الممكن إجراء تجربة للحساب بطريقة عكسية لنصل إلى موقع وكمية حركة إلكترون بالضبط عند زمن معين في الماضي مثلًا. والمستقبل أصلًا غير محدد وغير مؤكد، فنحن لا نعرف بالضبط إلى أين نحن ذاهبون، لكن الماضي محدد تمامًا؛ فنحن نعلم من أين جئنا. وباستعارة مقولة هايزنبرج «من الممكن أن نعرف — من حيث المبدأ — الماضي بكل تفاصيله». ويتناسب هذا الأمر تمامًا مع خبرتنا اليومية بطبيعة الزمن، من حيث حركتنا من ماضٍ معروف إلى مستقبل مجهول، وهي سمة أساسية في صميم عالم الكم، ومن الممكن ربط ذلك بسهم الزمن الذي نلاحظه للعالم ككل، وستناقش تضميناته الأكثر حيرة فيما بعد.

وفي حين بدأ الفلاسفة في التمسك ببطء بمثل هذه التضمينات المثيرة لعلاقات عدم التيقن كانت هذه التضمينات لبور شعاعًا من الضوء ينير الطريق للمفهوم الذي كان يحاول الوصول إليه لبعض الوقت. وحيث وجدت فكرة التكميلية لكل من صور الموجة والجسيمة ضرورة لفهم عالم الكم (مع أن الإلكترون في الواقع ليس بموجة ولا جسيمة) صيغة رياضية في علاقة عدم التيقن، أن الموقع وكمية الحركة معا لا يمكن معرفتهما بدقة، ولكنها كونت سمات تكميلية للواقع، وبشكل ما يستثني بعضها بعضًا. وفي الفترة ما بين يوليو/تموز ١٩٢٥ وسبتمبر/أيلول ١٩٢٧ لم ينشر بور

إلا القليل جدًّا في مجال نظرية الكم، ثم ألقى بعد ذلك محاضرة في كومو بإيطاليا فيما يعرف بـ«تفسير كوبنهاجن» أمام جمع غفير من الحضور قدم فيها لفكرة التكميلية.

أشار بور إلى أنه في الفيزياء الكلاسيكية نتصور أن منظومة أي جسيمات متداخلة تعمل مثل الساعة بصرف النظر عما إذا كانت مراقبة أم لا، أما في فيزياء الكم فإن المشاهد يتداخل مع المنظومة لدرجة أن المنظومة لا تنظر إليه كوجود مستقل، فإذا اخترنا قياس الموقع بدقة فإننا نجبر الجسيمة أن تطور المزيد من عدم التيقن في كمية الحركة والعكس صحيح، أي إذا اخترنا تجربة لقياس خصائص الموجة فإننا نتغاضى عن سمات الجسيمة، ولا توجد تجربة تكشف عن سمات الجسيمة والموجة في آن معًا، وهكذا. ويمكننا في الفيزياء الكلاسيكية وصف موقع الجسيمات بدقة في الزمكان والتنبؤ بمسلكها بنفس الدقة، أما في فيزياء الكم فلا نستطيع، وفي هذا السياق حتى النسبية تعتبر نظرية «كلاسيكية».

استغرق الأمر وقتًا طويلًا لتتطور هذه الأفكار ويستقر مغزاها، واليوم أصبحت السمات المحورية لتفسير كوبنهاجن أكثر سهولة في شرحها وفهمها بمدلول ما يحدث عندما يجري عالم ملاحظة تجريبية: أولًا: لا بد أن نسلم بأن مجرد ملاحظة الشيء تغير منه، وأننا نحن الملاحظون جزء حقيقي فعلًا من التجربة، ولا يوجد شيء مثل الساعة التي تدق سواء كنا ننظر إليها أم لا. ثانيًا: كل ما نعرفه هو نتائج التجربة؛ نستطيع النظر إلى الذرة لنرى الإلكترون عند مستوى طاقة A ثم عند النظر ثانية نرى الإلكترون عند مستوى طاقة B، وربما نتخيل أن الإلكترون قد قفز من المستوى A إلى المستوى B لأننا نظرنا إليه، ولكننا في الواقع لا يمكن أن نجزم بأنه هو الإلكترون نفسه، ولا نستطيع أن ندلي بأي شيء عما يحدث عندما كنا لا ننظر إلى الإلكترون، وما نستطيع تعلمه من هذه التجارب أو من معادلات نظرية الكم أنه من المحتمل أن نصل إلى الإجابة A إذا نظرنا إلى نظام ما، وعند النظر مرة ثانية قد نحصل على الإجابة B، ولا نستطيع أن نقول شيئًا عما حدث عندما كنا لا ننظر إليه، أو كيف وصل النظام من الحالة A إلى B إذا

حدث ذلك فعلًا. أما «الوثب الكمي الملعون» الذي سبب اضطراب شرودنجر فهو التفسير الحاصل لحصولنا على إجابتين مختلفتين لنفس التجربة، وهو تفسير خادع، وقد توجد بعض الأشياء في الحالة A بعض الوقت، وأحيانا أخرى في الحالة B، والسؤال هو: ما الذي يحدث بين الحالتين؟ أو كيف يحدث الانتقال من حالة لأخرى، وهو شيء غير ذي معنى تمامًا؟

وهذه في الحقيقة هي سمة أساسية لعالم الكم، ومن المثير أن هناك حدودًا لما نعرفه عما يفعله الإلكترون عندما لا ننظر إليه، بل إنه شيء مثير للحيرة تمامًا عندما نكتشف أنه ليست لدينا أي فكرة عما يحدث عندما لا ننظر إليه.

لقد قدم إدينجتون في ثلاثينيات القرن العشرين بعضًا من أفضل الأمثلة الفيزيائية حتى الآن لما يعني ذلك في كتابه «فلسفة العلم الفيزيائي»، وقد ركز على أن ما ندركه — ما نعلمه من تجاربنا — متأثر بدرجة كبيرة بتوقعاتنا، وقدم مثالًا على ذلك مقلقًا في بساطته، وسحب بذلك البساط من تحت هذه الملاحظات، قال: نفترض أن أحد الفنانين أخبرك بأن شكل رأس إنسان «مختبئة» في صخرة من الرخام، سنقول: «هراء»، لكن الفنان يبدأ حينئذ في نحت الرخام بشيء ليس أكثر من مطرقة وأزميل كاشفًا الشكل المختبئ؛ فهل هذه هي الطريقة التي «اكتشف» بها رذرفورد النواة؟ قال إدنجتون: «الاكتشاف لا يزيد عن الموجات التي تمثل المعرفة التي لدينا عن النواة، حيث إن نواة الذرة لم يرها أحد بالمرة، وكل ما نراه هو نتائج التجارب التي تؤدي إلى مدلول النواة. لم يجد أي إنسان البوزيترون إلى أن اقترح ديراك احتمال وجوده، ويدعي الفيزيائيون هذه الأيام معرفة عدد أكبر لما يسمى بالجسيمات الأساسية أكثر من العناصر المعروفة في الجدول الدوري. وكان الفيزيائيون في ثلاثينيات القرن العشرين مأخوذين بالتنبؤ بجسيمات جديدة أخرى، النيوترينوات المطلوبة لتفسير تداخل سبين (الحركة المغزلية) الرقيق في بعض تفاعلات التفكك الإشعاعي، وقال إدنجتون: «لست مرتاحًا لنظرية النيوترينو» وأضاف: «ولا أعتقد في وجود النيوترينوات» لكن «هل أجرؤ أن أقول إن الفيزيائيين التجريبيين ليس لديهم البراعة الكافية لصنع النيوترينوات؟»

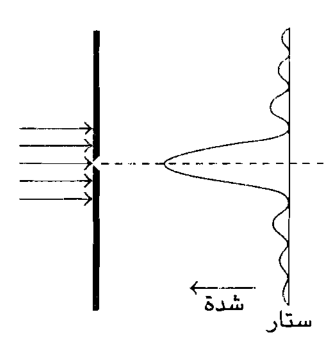
ومنذ ذلك الحين حدث بالفعل «اكتشاف» ثلاثة تشكيلات مختلفة (بالإضافة إلى ثلاثة تشكيلات مضادة مختلفة) كما افترض وجود أنواع أخرى، هل من الممكن حقيقة أخذ شكوك إدنجتون مأخذ الجد؟ وهل من المحتمل أن النواة والبوزيترون والنيوترينو لم تكن موجودة إلى أن اكتشف التجريبيون نوع الأزميل المناسب لكشف أشكالها؟ وتضرب مثل هذه التخمينات على جذور صحة عقولنا، علاوة على مفهومنا عن الواقعية، لكنها أسئلة معقولة تماما يمكن طرحها في عالم الكم. وإذا تتبعنا كتاب وصفة الكم بطريقة صحيحة يمكننا القيام بتجربة ينتج منها عدة قراءات نستطيع تفسيرها كمؤشرات على وجود نوع معين من الجسيمات، وفي كل مرة نستخدم نفس الوصف غالبًا نحصل على نفس المجموعة من القراءات، ولكن التفسيرات بمدلول الجسيمات كلها في الأذهان، وربما لا تكون أكثر من خداع متماسك، ولا تدلنا المعادلات على أي شيء مما تفعله الجسيمات عندما لا ننظر إليها، فلم ينظر أحد أبدًا للنواة قبل رذرفورد، وقبل ديراك لم يتخيل أحد وجود البوزيترون. فإذا كنا لا نستطيع أن نقول ماذا تفعل الجسيمة عندما لا ننظر إليها ولا نستطيع أن نجزم بوجودها عندما لا ننظر إليها، فمن المنطقي أن ندعي أن النواة والبوزيترون لم يكن لهما وجود قبل القرن العشرين لأنه لم يحدث أن رأي أي إنسان هذه الجسيمات قبل القرن العشرين. وما تراه في عالم الكم هو ما تحصل عليه، وليس هناك شيء حقيقي، وأقصى ما نأمل فيه أن تتوافق مجموعة من الخدع بعضها مع بعض، ولسوء الحظ، حتى هذه الآمال قد تحطمت بواسطة بعض التجارب الأكثر بساطة؛ فهل تذكر تجارب الشق الطولي المزدوج التي برهنت على الطبيعة الموجية للضوء؟ كيف يمكن تفسيرها بمدلول الفوتونات؟

تجربة الثقبين

أحد أفضل المعلمين وأفضل المعروفين في ميكانيكا الكم على مدار العشرين سنة الماضية هو ريتشارد فينمان من معهد كاليفورنيا للتقنية، وقد قدم مرجعه المؤلف من ثلاثة أجزاء والمنشور في أوائل ستينيات القرن العشرين

«محاضرات فينمان في الفيزياء» وهو مرجع قياسي تقارن به المراجع الأخرى للطلاب الجامعيين، وألقى محاضرات عامة في الموضوع نفسه مثل تلك الحلقات في تلفزيون BBC عام ١٩٦٥ التي نشرت تحت عنوان «خاصية القانون الفيزيائي»، ولد فينمان سنة ١٩١٨ وكان في قمة عطائه كفيزيائي نظري في الأربعينيات من القرن العشرين، حيث كان منهمكًا في وضع معادلات نسخة الكم الخاصة بالكهرومغناطيسية، تحت اسم الكهربية الديناميكية للكم، وحصل على جائزة نوبل سنة ١٩٦٥ عن هذا الإنجاز، ومكانة فينمان الخاصة في تاريخ نظرية الكم تجعله ممثلًا للجيل الأول للفيزيائيين الذين شبوا مع كل أسس ميكانيكا الكم، وأرسوا كل القواعد الأساسية. وكان على هايزنبرج وديراك أن يعملا في بيئة متغيرة، حيث الأفكار الجديدة لا تتوالى بالصورة الصحيحة، ولا العلاقة المنطقية بين مفهوم وآخر — كما في حالة سبين، الحركة المغزلية — تلاحظ بالضرورة على التو، أما جيل فينمان فقد كانت كل أجزاء اللغز متاحة لهم ومن الممكن رؤية منطق ترتيبها لأول مرة، وقد لا يكون ذلك في لمحة خاطفة، لكن بالتأكيد بعد تفكير قليل ومجهود ذهني، وهكذا فإن ما يجدر الإشارة إليه أنه في حين كان باولي وأتباعه يفكرون — والموضوع مازال ساخنًا — أن علاقات عدم التيقن هي المكان المناسب للبدء في مناقشة وتدريس نظرية الكم، توصل فينمان وهؤلاء المعلمون في العقود الحديثة — الذين ينظرون إلى المنطق بأنفسهم بدلًا من إعادة إنتاج أفكار الأجيال السابقة — إلى نقطة بداية مختلفة. قال فينمان في الصفحة الأولى من مرجعه الخاص بمحاضراته والمخصص لميكانيكا الكم: «إن العنصر الأساسي في نظرية الكم هو تجربة الشق الطولي المزدوج، لماذا؟ لأن هذه ظاهرة مستحيلة، مستحيلة بشكل مطلق لتفسيرها بطريقة كلاسيكية، وبها لب ميكانيكا الكم، وفي الواقع فإنها تتضمن الشيء الوحيد الغامض ... والغرائب الرئيسية في كل ميكانيكا الكم.»

ومثل عظماء الفيزيائيين في الثلث الأول من هذا القرن، حاولت في كل ما ذكرت في هذا الكتاب من قبل أن أشرح أفكار الكم بمدلول الحياة اليومية، ولنبدأ الآن بالغموض المحوري بأن نزيح الضوء الوامض من خبرتنا اليومية



شكل ٨-١: شعاع إلكتروني يمر خلال شق مفرد طولي ينتج عنه توزيع لأغلب «الجسيمات» التي تشاهد في خط مستقيم على امتداد الشق.

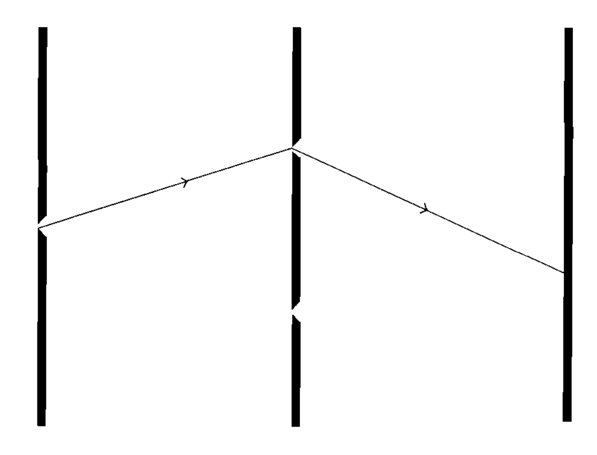
بعيدًا بقدر المستطاع، وأن نشرح العالم الواقع على ضوء ميكانيكا الكم. وليس هناك شيء في خبرتنا اليومية يمكن أن نحاكيه في عالم الكم، كما أن سلوك عالم الكم ليس له أي شبيه مألوف، ولا يعلم أي إنسان كيف يسلك عالم الكم، وكل ما نعرفه أنه يسلك بتلك الطريقة، وهناك فقط قشتان يمكن التعلق بهما: الأولى هي أن كل من الجسيمات (الإلكترونات) والموجات (الفوتونات) تسلك بالطريقة نفسها، فقواعد اللعبة متماسكة. أما القشة الثانية، وكما ذكرها فينمان، فإن هناك شيئًا غامضًا واحدًا، فإذا اقتنعت بتجربة الشق الطولي المزدوج يكون أكثر من نصف المعركة قد حسم، حيث إنه «وكما يبدو فإن أي موقف آخر في ميكانيكا الكم يمكن شرحه دائمًا بأن نقول: هل تذكر حالة التجربة ذات الثقبين؟ إنه الشيء نفسه.»*

تتم التجربة على النحو الآتي: تخيل ستارة من نوع ما — ربما حائط — به ثقبان صغيران، من الممكن أن يكونا شقين ضيقين كما في تجربة يونج الشهيرة للضوء — لكن صغيرين — وقد يقوم بالمهمة نفسها ثقبان مستديران صغيران، وعلى أحد جانبي الحائط حائط آخر به كشاف

* خاصية القانون الفيزيائي ص١١٢.

معين، فإذا أجريت التجربة مع الضوء، فمن الممكن أن يكون الكشاف سطحًا أيضًا، يمكن عليه رؤية الضوء والحزم الداكنة، أو من الممكن أن يكون الكشاف لوحًا فوتوغرافيًّا، يمكن إظهار الناتج عليه ودراسته فيما بعد، وإذا تم العمل في وجود إلكترونات، فقد تبدو الستارة مغطاة بترتيب مكون من عدد كبير من كاشفات الإلكترونات، أو من الممكن تصور استخدام كشاف متحرك على عجل يمكن تحريكه كما نشاء لإيجاد عدد الإلكترونات التي تصل إلى بقعة معينة على الستارة، وليست التفاصيل مهمة مادامت هناك طريقة ما لرصد ما يحدث على الستارة، وعلى الجانب الآخر من الحائط المحتوي على الثقبين يوجد مصدر للفوتونات أو الإلكترونات أو أي شيء آخر، وقد يكون هذا المصدر مجرد مصباح أو قاذف إلكترونات مثل ذلك الذي يكون الصورة على شاشة تلفزيونك، ومرة ثانية فإن التفاصيل غير ذات أهمية. ما الذي يحدث عند مرور هذه الأشياء خلال الثقبين لتصل إلى الستارة؟ أي نسق تصنع عندما تصل إلى الكاشف؟

أولًا: ابتعد عن عالم الكم للفوتونات والإلكترونات، وانظر إلى ما يحدث في عالمنا اليومي، من السهل رؤية كيف تحيد الموجات عند مرورها خلال الثقوب عند استخدام حوض مليء بالماء ثم غمر التجربة فيه، والمصدر في هذه التجربة مجرد تصميم من نوع ما يهتز إلى أعلى وإلى أسفل ليكون موجات منتظمة، تنتشر الموجات خلال الثقبين مكونة نسقًا منتظمًا من القمم والقيعان على طول الكشاف نتيجة لتداخل الموجات الآتية من كل ثقب، وإذا حجبنا أحد الثقبين على الحائط فإن ارتفاع الموجات على الستارة سيتغير بصورة بسيطة منتظمة، تكون أعلى الموجات هي الأقرب للثقب عبر أقصر مسافة في الحوض، وتقل سعة الموجات على كل من الجانبين، ويتكون النسق نفسه إذا حجبنا ذلك الثقب وفتحنا الذي كان مغلقًا في السابق. وتتناسب شدة الموجة، التي هي مقياس كمية الطاقة التي تحملها، مع مربع الارتفاع أو السعة، H^2، وتظهر نسقًا متماثلًا لكل ثقب على حدة، ولكن عندما يكون كل من الثقبين مفتوحًا فإن النسق سيصبح أكثر تعقيدًا، وتوجد بالفعل قمة عالية ما بين الثقبين ولكن الشدة تقل كثيرًا على جانبي



شكل ٨-٢: إلكترون أو فوتون يمر خلال أحد الشقين الطوليين «يجب» تبعًا لما هو متوقع أن يسلك بالطريقة نفسها إذا مر خلال شق طولي مفرد.

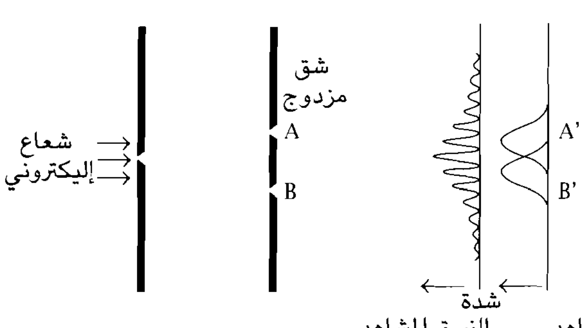
القمة، حيث إن مجموعتي الموجات تلاشى بعضها بعضًا، ويتكرر تباعًا نسق من ارتفاعات وانخفاضات إذا تحركنا على الستارة. وقد وجد رياضيًّا أنه بدلًا من أن تكون شدة الثقبين معًا هي حاصل جمع كل منهما على حدة (حاصل جمع المربعات)، نجد أن الشدة تساوي مربع حاصل جمع سعة كل منهما، وإذا رمزنا لسعة الموجات بـH، J فإن الشدة I لا تساوي $H^2 + J^2$، لكنها تصبح

$$I = (H + J)^2$$

لتصبح

$$I = H^2 + J^2 + 2HJ$$

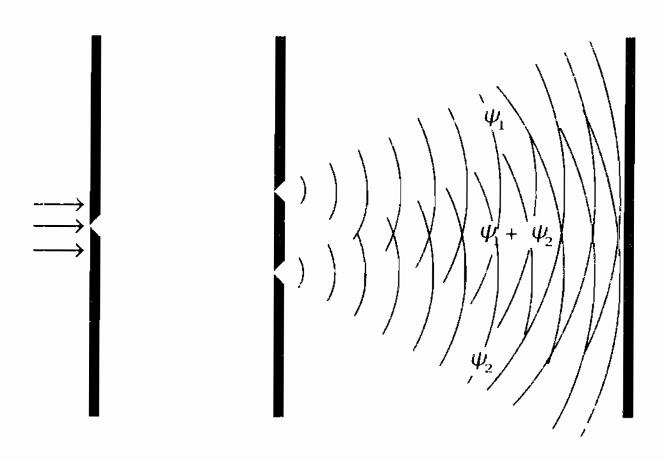
والحد الإضافي هو المساهمة الراجعة إلى تداخل الموجتين، وإذا سمحنا لقيم H's، J's أن تكون سالبة أو موجبة فإن ذلك يفسر بدقة القمم والقيعان لنسق التداخل.



شكل ٨-٣: توضح التجارب أن النسق المشاهد بالنسبة للإلكترونات والفوتونات، عندما يكون كل من الثقبين «مفتوحًا» فإن هذا النسق لا يماثل حاصل جمع الثقبين عند رؤية كل منهما على حدة.

وإذا قمنا بتجربة من نفس النوع مستخدمين جسيمات كبيرة في حياتنا اليومية (تخيل فينمان بغرابة شديدة تجربة تتضمن مدفعًا رشاشًا يطلق طلقاته خلال الثقوب الموجودة على الحائط، وقد رُصَّت أجولة مملوءة بالرمل عند الكشاف لالتقاط هذه الطلقات)، ولن نجد أي «مدلول للتداخل»، وقد نجد بعد إطلاق عدد كبير من الطلقات خلال الثقوب أعدادًا مختلفة من الطلقات في الأجولة المختلفة، وعندما كان ثقب واحد فقط هو المفتوح، فإن نسق انتشار الطلقات حول «الستارة» يماثل تمامًا نسق توزيع الشدة لموجات الماء عندما كان ثقب واحد مفتوحًا، ولكن عندما يكون كلا الثقبين مفتوحًا فإن نسق توزيع الطلقات في الأجولة يكون بالفعل مساويًا لمجموع التأثير الناتج من الثقبين المنفصلين، ومعظم الطلقات توجد في المنطقة خلف الثقبين مباشرة ثم تتلاشى بهدوء دون وجود قمم أو قيعان نتيجة للتداخل، وفي هذه الحالة، وباعتبار أن كل طلقة تمثل وحدة الطاقة، فإن توزيع الشدة يكون

$$I = I_1 + I_2,$$

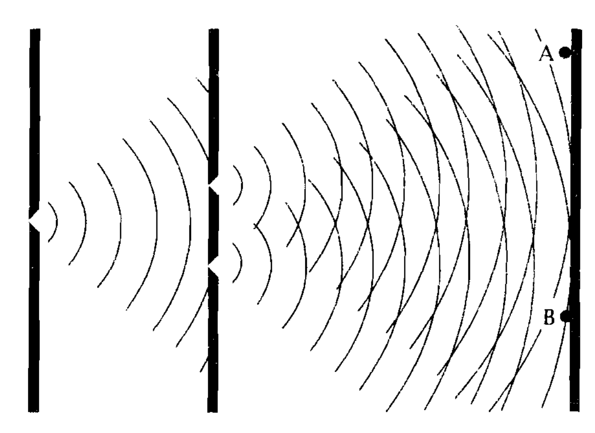


شكل ٨-٤: يبدو أن «موجات الاحتمال» هي التي تقرر أين تتجه كل «جسيمة» في الشعاع، وأن موجات الاحتمال تتداخل مثلما تفعل موجات الماء بالضبط (راجع الشكل ١-٣).

حيث I ترمز لـH^2، وI_2 لـJ^2 في مثال الموجات ولا يوجد مدلول للتداخل.

وأنت تعلم ما سيأتي بعد ذلك؛ تخيل الآن أننا أجرينا التجارب نفسها باستخدام الضوء والإلكترونات، وفي الحقيقة أُجْرِيَت تجربة الشق الطولي المزدوج مرات عديدة، وعديدة باستخدام الضوء ونتج عن ذلك أنساق حيود بالضبط كما في مثال الموجات. لم تُجر تجربة الإلكترون بالطريقة نفسها — هناك مشاكل عند إجراء التجارب بالنسبة للأشياء الصغيرة — لكن أُجريت تجارب مماثلة لتشتت أشعة الإلكترونات عن ذرات موجودة في بلورات، وعليه وللمحافظة على عدم تعقيد الأمور سأتمسك بالتجربة الخيالية للشق الطولي المزدوج مترجمًا ذلك إلى لغة النتائج غير المبهمة التي نحصل عليها من تجارب الإلكترونات الحقيقة؛ فالإلكترونات مثل الضوء تمامًا تعطي نسقًا للحيود.

وماذا بعد؟ أليست هذه مجرد ازدواجية الجسيمة/الموجة التي تعلمنا التعايش معها؟ والعبرة هنا أننا اعتدنا التعايش معها لأغراض كتاب طهي الكم، ولكننا لم ننظر بتعمق إلى ما بها من تضمينات، وقد حان الوقت لنفعل



شكل ٨-٥: قواعد سلوك الموجة مطلوبة لتحديد ظهور الإلكترون عند A أو B، إلا أنه عندما ننظر إلى A أو B فنحن إما أن نرى إلكترونًا — جسيمة — أو لا نرى شيئًا. إننا لا نرى الموجة. ولا نستطيع القول ما الذي يفعله الإلكترون في الحقيقة أثناء مروره خلال الجهاز.

ذلك: فدالة شرودنجر ψ، المتغير في معادلة الموجة الخاصة بها، لها علاقة ما بالإلكترون (أو أي جسيمة تصفها المعادلة)، فإذا كانت ψ موجة، فليس من الغريب أنها تحيد وتنتج نسق تداخل، وإنها لخطوة بسيطة أن نبين أن ψ تعمل كسعة الموجة، وأن ψ^2 تعمل كالشدة، وأن نسق حيود الإلكترون في تجربة الثقبين هو نسق من ψ^2، وإذا كان في الشعاع إلكترونات عديدة، وهذا استنتاج بسيط، فإن ψ^2 تمثل احتمالية وجود إلكترون في مكان ما معين، وتندفع آلاف الإلكترونات خلال الثقبين ويمكن التنبؤ بالمكان الذي تصل إليه على أسس إحصائية مستخدمين هذا التفسير للموجة ψ — وهذا هو إسهام بورن العظيم في عملية طهي الكم — لكن ما الذي يحدث لكل إلكترون مفرد؟

إننا نستطيع أن نفهم بسهولة كافية أن الموجة — قد تكون موجة ماء — تستطيع المرور خلال الثقبين في الحاجز؛ فالموجة شيء منتشر. لكن الإلكترون مازال يبدو كجسيمة حتى لو صاحبته خصائص تشبه الموجة.

ومن الطبيعي أن نعتقد أن كل إلكترون منفرد «لا بد» وبالتأكيد أن يمر خلال أحد الثقبين، ومن الممكن أن نحاول تجريبيًّا حجب أحد الثقبين كل على حدة دوريًّا، وعندما نفعل ذلك فإننا نحصل على النسق المعتاد على الستارة لتجارب الثقب الأوحد، أما عند فتح الثقبين معًا، فإننا لن نحصل على النسق الناتج من جمع النسقين معًا كما في حالة طلقات الرصاص، وبدلًا من ذلك فإننا سنحصل على نسق التداخل كما في حالة الموجات، وسنظل نحصل على النسق نفسه حتى لو أبطأنا إطلاق الإلكترونات للدرجة التي يمر فيها إلكترون واحد فقط كل لحظة خلال منظومة الثقبين، ونستطيع أن نخمن أن إلكترونًا واحدًا سيمر خلال ثقب واحد ويصل إلى الكشاف ليأتي بعده إلكترون آخر وهكذا. فإذا انتظرنا صابرين ليمر عدد كاف من الإلكترونات فإن النسق الذي سيتكون على شاشة الكشاف هو نسق حيود الموجات، ومن المؤكد أنه في حالة الإلكترونات والفوتونات إذا أجرينا ألف تجربة مماثلة في ألف معمل مختلف وجعلنا جسيمة واحدة تعبر في كل تجربة، سنجمع ألف نتيجة مختلفة لكن بها كلها نسق يتمشى مع الحيود تمامًا كما لو كنا قد جعلنا ألف إلكترون تعبر معًا في واحدة من هذه التجارب، ويخضع الإلكترون المنفرد أو الفوتون المنفرد لقوانين الإحصاء عند عبوره خلال أحد الثقبين على الحائط، تلك القوانين المناسبة فقط إذا «عرفت» الجسيمة أولًا أن الثقب الآخر مفتوح، وهذا هو الغموض المحوري في دنيا الكم.

نستطيع محاولة الخداع، وذلك بغلق أو فتح أحد الثقبين بسرعة في حين يكون الإلكترون في حالة انتقال خلال الجهاز، ولن يفيد ذلك؛ فالنسق على الشاشة دائمًا هو «الصحيح» لحالة الثقوب عند لحظة مرور الإلكترون من خلالها، ويمكن أن نختلس النظر «لنرى» من أي الثقبين يمر الإلكترون. وعند إجراء تجربة مماثلة لهذه التجربة تأتي النتيجة أكثر غرابة: لنتخيل تصميمًا يسمح لنا بتسجيل أي الثقبين يعبر الإلكترون من خلاله، ويتركه ليعبر ويصل إلى شاشة الكشاف، وهنا تسلك الإلكترونات مسلكًا عاديًا كأي جسيمات في الحياة اليومية تحترم نفسها، ونرى الإلكترون دائمًا عند ثقب أو عند الآخر، وليس عند الثقبين أبدًا في آن واحد، والآن فإن النسق الذي

يتكون على شاشة الكشاف سيكون مكافئًا تمامًا لنسق الرصاصات دون وجود أي أثر للتداخل. وفي هذه الحالة، لا تعرف الإلكترونات ما إذا كان الثقبان مفتوحين أم لا، لكنها تعرف إذا كنا نراقبها أم لا، وعليه تكيف من سلوكها وفقًا لذلك، ولا يوجد مثال أوضح من ذلك لتداخل المشاهد مع التجربة. وعندما نحاول النظر إلى موجة الإلكترون المنتشرة نجدها تنهار إلى جسيمة محددة، أما إذا كنا لا ننظر فإنها تتحرك نفسها بكل الاحتمالات. وبمدلول احتمالات بورن فإن الإلكترون قد أصبح مضطرًا، بناءً على قياساتنا، لاختيار مسار واحد من احتمالات عديدة؛ فهناك احتمال معين أن ينفذ من أحد الثقبين، وهناك احتمال مكافئ أن يتجه إلى الثقب الآخر، وينتج احتمال التداخل هذا نسق الحيود عند الكشاف، وعندما نكتشف الإلكترون، مع أنه يكون في مكان واحد مما يغير من نسق الاحتمالية في المستقبل — بالنسبة للإلكترون — ومعروف الآن بالتأكيد أي الثقبين يمر منهما، أما إذا لم ينظر أحد إليه، فحتى الطبيعة نفسها لا تعرف من أي الثقبين مر الإلكترون.

الموجات المنهارة

ما نراه هو ما نحصل عليه، وأي ملاحظة من التجربة تصبح فقط في نطاق التجربة ولا يمكن استخدامها لتدلنا على تفاصيل أشياء لم نشاهدها، ونستطيع القول إن تجربة الشق الطولي المزدوج تدلنا على أننا نتعامل مع موجات، وبنفس القدر بالنظر فقط إلى النسق على شاشة الكشاف يمكن استنتاج أن بالجهاز ثقبين وليس ثقبًا واحدًا، وكل ما يعنينا هو أن الجهاز والإلكترونات والمشاهد كلها مكونات التجربة. ولن نستطيع القول إن الإلكترون يمر من خلال أحد الثقبين دون النظر إلى الثقبين أثناء مروره (وهذه تجربة مختلفة). يترك الإلكترون مصدر القذف ويصل إلى الكشاف ويبدو أنه يمتلك كل المعلومات المحيطة بالتجربة بما فيها المشاهد. وكما شرح فينمان لمشاهديه في تلفزيون BBC سنة ١٩٦٥ أنه إذا كان لديك جهاز

قادر على أن يدلك من أي الثقبين سيمر الإلكترون من خلاله، فإنك تستطيع القول إنه سيمر من خلال ثقب أو من خلال الآخر، ولكن إذا لم يوجد جهاز يحدد أي الثقبين قد مر منه الإلكترون فحينئذ ليس في الاستطاعة القول إنه مر من ثقب دون الآخر، وقال: «إذا جزمت أن الإلكترون يمر من ثقب وليس من الآخر دون مشاهدة ذلك فهذا إدعاء خاطئ.» أصبح تعبير هوليستي holistic أو شامل كلمة طنانة أسيء استخدامها، الأمر الذي يجعلني مترددًا في استخدامها، إلا أنه ليس هناك تعبير مناسب أكثر لوصف عالم الكم؛ إنه هوليستي holistic شامل، فيه الأجزاء ترتبط بشكل ما بالكل، ولا يعنى ذلك فقط كل بنود التجربة. ويبدو أن العالم يحتفظ بكل خياراته وكل احتمالاته متاحة لفترة طويلة بقدر الإمكان. وأغرب شيء حول تفسير كوبنهاجن القياسي عن عالم الكم هو أن فعل مشاهدة منظومة ترغمها على اختيار أحد الخيارات فقط، ويصبح هذا الخيار واقعًا.

إن تداخل الاحتمالات في أبسط تجارب الثقبين يمكن تفسيرها على أن الإلكترون عند تركه لمصدر القذف يتلاشى ويحل محله مجموعة من الإلكترونات الأشباح يسلك كل منها مسارًا مختلفًا حتى تصل إلى شاشة الكشاف، تتداخل تلك الأشباح بعضها مع بعض، وعند النظر إلى الطريقة التي تكتشف بها هذه الإلكترونات على الشاشة نجد حينئذ آثار هذا التداخل حتى لو كنا نتعامل مع إلكترون حقيقي واحد كل مرة، وعلى كل فإن وفرة الإلكترونات الأشباح هذه تصف الموقف فقط عندما لا ننظر إلى ما يحدث، أما عندما ننظر فتختفي كل الأشباح ماعدا واحدًا فقط، وهذا الواحد من الأشباح يتجسد كإلكترون حقيقي. وبمدلول معادلة شرودنجر للموجة فكل واحد من الأشباح يعبر عن موجة، أو بالأحرى حزمة من الموجات التي اعتبرها بورن مقياسًا للاحتمالية، ويماثل مشاهدة شبح واحد يتبلر من بين إلكترونات عديدة — بمدلول تعبير الميكانيكا الموجبة — اختفاء مجموعة موجات الاحتمالات ماعدا حزمة واحدة من الموجات التي تصف إلكترونا حقيقيًّا واحدًا، ويسمى هذا «انهيار دالة الموجة»، ومع غرابة ذلك فإنه يقع في صلب تفسير كوبنهاجن الذي هو نفسه أساس طهي الكم. وعلى كل فإن

الأمر يدعو للشك حيث إن العديد من الفيزيائيين ومهندسي الإلكترونيات وآخرين يستخدمون وهم سعداء كتاب طهي الكم مقدرين أن القواعد التي أثبتت أنه يمكن الاعتماد عليها في تصميم الليزر والحاسوب ودراسة المادة الجينية، تعتمد صراحة على افتراض أن عددًا وافرًا من الجسيمات الأشباح تتداخل مع بعضها طول الوقت وتندمج كلها في جسيمة وحيدة حقيقية كحالة انهيار دالة الموجة أثناء المشاهدة. وما هو أسوأ من ذلك، أنه في اللحظة التي نتوقف فيها عن مشاهدة الإلكترون أو أي جسيمة أخرى ننظر إليها فإنها تنشطر في الحال إلى عدد وافر من الجسيمات الأشباح، يسلك كل منها مساره من الاحتمالات خلال عالم الكم. لا شيء حقيقي إلا عندما ننظر إليه، ويتوقف هذا الشيء عن أن يكون حقيقيًا في اللحظة التي نتوقف فيها عن النظر إليه.

وربما تعود سعادة الناس الذين يستخدمون كتاب طهي الكم إلى الراحة التي تأتيهم من تعودهم على المعادلات الرياضية، ويشرح فينمان الوصفة الأساسية ببساطة: «فالحدث» في ميكانيكا الكم هو مجموعة من الظروف الأولية والنهائية لا أكثر ولا أقل، يترك الإلكترون مصدر القذف من أحد طرفي الجهاز ثم يصل هذا الإلكترون إلى كشاف معين في الطرف الآخر من الثقوب، هذا حدث. وفي الأساس، فإن احتمال حدوث هذا الحدث هو مربع أحد الأعداد التي هي في الأساس دالة شرودنجر الموجية، ψ، فإذا كانت هناك أكثر من طريقة لحدوث هذا الحدث (كلا الثقبين مفتوح في التجربة)، عندئذ تكون احتمالية كل حدث ممكن (احتمال وصول الإلكترون لكل كشاف اختير) تساوي مربع مجموع قيم ψ's، وعليه هناك تتداخل، ولكن إذا نظرنا لنشاهد أي الاحتمالات البديلة هو الذي يحدث بالفعل (النظر لنرى من أي ثقب يمر الإلكترون) فهنا احتمال التوزيع هو حاصل جمع مربع قيم ψ's، ويعني اختفاء مصطلح التداخل، أي تنهار دالة الموجة.

الفيزياء مزعجة، لكن الرياضيات نظيفة وبسيطة، ومعادلاتها مألوفة لأي فيزيائي، ومادمت تتجنب السؤال عما تعنيه فليس هناك أي مشكلة، ولو سألت لماذا العالم على هذا الشكل، فإن الجواب حتى من فينمان «ليس

لدينا أي فكرة». ولو ظللت تصر على صورة فيزيائية لما يحدث فستجد كل الصور الفيزيائية تذوب في عالم من الأشباح تبدو فيه الجسيمات حقيقية فقط عندما ننظر إليها، وحتى خصائص مثل كمية الحركة والموقع هي أشياء من صنع المشاهدة. وليس من العجيب على الإطلاق أن نجد العديد من الفيزيائيين الأجلاء، ومن بينهم أينشتاين يقضون العقود في محاولة إيجاد طرق تدور حول هذا التفسير لميكانيكا الكم، وقد باءت هذه المحاولات بالفشل، وهي المحاولات التي سنصفها بإيجاز في الفصل القادم، وكانت كل محاولة جديدة لإثبات عدم صحة تفسير كوبنهاجن تقوي أسس صورة عالم أشباح الاحتمالات، وتمهد الطريق لما بعد ميكانيكا الكم، وتطور صورة جديدة للعالم الهوليستي الشامل، وأساس هذه الصورة الجديدة هو التعبير الأقصى لمفهوم التكميلية، لكن هناك تظل طلقة نهائية نعض عليها بالنواجذ قبل أن نتمكن من النظر في التضمينات.

قواعد التكميلية

وعادة تمثل النسبية العامة وميكانيكا توأم انتصار النظريات العلمية في القرن العشرين، وأن الكأس المقدسة للفيزيائيين اليوم هو التوحيد الحقيقي لهاتين النظريتين في نظرية عظمى واحدة، وتعطي مجهوداتهم بكل تأكيد، كما سنرى، نفاذ بصيرة عميقة لطبيعة الكون، ولكن يبدو أن هذه المجهودات لا تأخذ في حسبانها حقيقة أنه بالمنطق الصارم لا يمكن التوفيق بين هاتين الصورتين للعالم.

وفي أول عرض لبور سنة ١٩٢٧ لِمَا أصبح معروفًا باسم تفسير كوبنهاجن، ركز على التناقض بين وصف العالم من منطلق محاور الزمان ومكان البحتة والسببية المطلقة من جهة، وبين صورة الكم التي يتداخل فيها المشاهد ويصبح طرفًا في المنظومة التي يراها من جهة أخرى، وتمثل محاور الزمكان الموقع، وتعتمد السببية على معرفة أين تتجه الأشياء بالضبط، وبصفة ضرورية معرفة كمية حركتها. وتفترض النظريات الكلاسيكية أنك

تستطيع معرفة الاثنين في آن معًا، وتوضح ميكانيكا الكم أن الدقة في محاور الزمكان تكون على حساب عدم التيقن من كمية الحركة، وعليه من السببية، ومن هذا المفهوم فإن النسبية العامة نظرية كلاسيكية ولا يمكن اعتبارها مكافئة لميكانيكا الكم كأساس في وصف الكون، فإذا حدث وكان هناك تناقض بين النظريتين فلا بد من الرجوع إلى نظرية الكم لما بها من وصف أفضل للعالم الذي نعيش فيه.

ولكن ما العالم الذي نعيش فيه؟ اقترح بور أن فكرة العالم المنفرد ذاتها ربما تكون مضللة وقدم تفسيرًا آخر لتجربة الثقبين، ومن الطبيعي حتى في هذه التجربة البسيطة أن تكون هناك مسارات عديدة يمكن أن يختارها الإلكترون أو الفوتون خلال الثقبين، لكن دعنا نتظاهر للتبسيط أن هناك احتمالين فقط، أي أن الجسيمة تمر خلال الثقب A أو الثقب B، واقترح بور أن كل احتمال ربما يمثل عالمًا مختلفًا؛ في أحد العالمين تمر الجسيمة خلال الثقب A وفي الآخر تمر خلال الثقب B، إلا أن العالم الحقيقي، العالم الذي نعايشه، ليس بهذه البساطة على العموم، فعالمنا هجين من اندماج العالمين المحتملين معبرًا من المسلكين الذين تسلكهما الجسيمة، ويتداخل كل عالم مع الآخر، وعندما ننظر لنرى أي ثقب تمر خلاله الجسيمة يكون هناك عالم واحد لأننا استبعدنا الاحتمال الآخر، وفي هذه الحالة لايوجد تداخل. لم تكن الإلكترونات الأشباح هي تلك التي استحضرها بور من معادلات الكم فقط بل كانت أيضًا الوقائع الشبحية وعوالم الأشباح التي توجد فقط عندما لا ننظر إليها. تخيل هذا المثال البسيط وقد طُوِّرَ ليشمل ليس العالمين المتحدين بتجربة الثقبين فقط، بل عددًا وافرًا من الوقائع الشبحية، تلك الوقائع التي تقابل الوسائل العديدة التي يستطيع فيها كل منظومة كم في كافة أنحاء الكون أن «تختار» كيف تقفز: كل دالة موجية محتملة لكل جسيمة محتملة، وكل قيم عدد ديراك q، اربط هذا بلغز أن الإلكترون عند الثقب A يعلم ما إذا كان الثقب B مفتوحًا أم لا، ومن السهل أن نرى لماذا هوجم تفسير كوبنهاجن بهذا العنف من خبراء يفهمون أعمق تضميناته، في حين كان هناك خبراء آخرون، مع تشوشهم بهذه التضمينات،

فقد وجدوا أن التفسيرات ملزمة، ومجموعة أخرى أقل شراسة، غير عابئة بالتضمينات العميقة، قد استمرت وهم سعداء في استخدام كتاب طهي الكم ودوال الموجة المنهارة، وكل ذلك لتحويل العالم الذي نعيش فيه.

الفصل التاسع

التناقضات والاحتمالات

قام كل هجوم على تفسير كوبنهاجن بزيادة قوة مكانتها، وعندما حاول مفكرون من أمثال أينشتاين إيجاد عيوب في النظرية كان المدافعون عنها قادرين على التفنيد والرد على دفوع المهاجمين، الأمر الذي خرجت منه النظرية أقوى بعد تلك المحاكمات، ومن المؤكد أن تفسير كوبنهاجن «صحيح» من مفهوم أنه قابل للاستخدام، وأي تفسير آخر لقواعد الكم لا بد أن يتضمن تفسير كوبنهاجن كرؤية قابلة للاستخدام، وأنها تمكن التجريبيين من التنبؤ بنتائج تجاربهم على الأقل بالمعنى الإحصائي — وتمكن المهندسين من تصميم أنظمة الليزر العاملة والكمبيوتر وخلافه. وليس هناك داع للخوض في كل الأمور الأساسية من المفندين بآراء مضادة لتفسير كوبنهاجن، حيث قد تم ذلك عن طريق آخرين بصورة جيدة، لكن ربما يكون من أهم الآراء المهمة التي ذكرها هايزنبرج سابقًا سنة ١٩٥٨ في كتابه «الفيزياء والفلسفة» حيث ركز هايزنبرج على أن كل المقترحات المضادة «مجبرة أن تضحي بالتماثل الأساسي لنظرية الكم (مثلًا بالتماثل بين الموجات والجسيمات أو بين الموقع والسرعة)، وعليه فمن الممكن جدًّا أن نقترح أنه لا يمكن تجنب تفسير كوبنهاجن إذا ظلت خصائص التماثل ... سمة أساسية في الطبيعة، وأن كل تجربة تجري حتى الآن تعضد هذه الرؤية.» (صفحة ١٢٨).

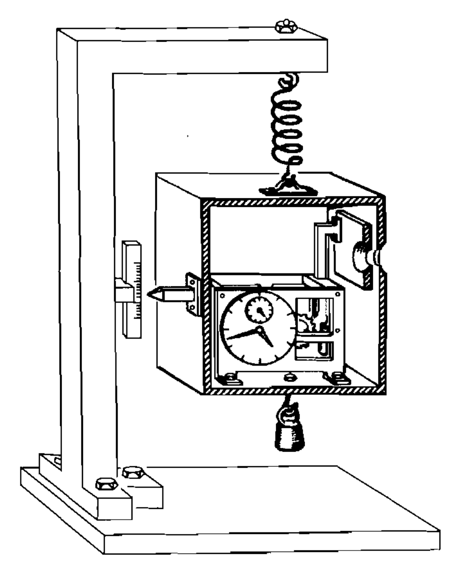
وقد حدث تحسين لتفسير كوبنهاجن (ليس هجومًا ولا اقتراحات مضادة) مازال يتضمن هذا التماثل الأساسي، وأحسن صورة يمكن تقبلها لواقع الكم ستشرح في الفصل الحادى عشر. وعلى كل فيكاد أن يكون غريبًا

أن يغفل هايزنبرج عن ذكر ذلك في كتابه المنشور سنة ١٩٥٨، حيث إن تلك الصورة الجديدة كانت قد ظهرت في ذلك الوقت بواسطة طالب دكتوراه في الولايات المتحدة. وعلى كل وقبل التطرق لهذا من الصواب أن نقتفي أثر مسار اندماج النظرية بالتجربة الذي أُنجز بداية عام ١٩٨٢، وأرسى دون أدنى شك دقة تفسير كوبنهاجن كرؤية قابلة للاستخدام في الواقع الكمي، وتبدأ القصة بأينشتاين وتنتهي في معمل للفيزياء في باريس بعد خمسين عامًا، وهي واحدة من أعظم القصص في العالم.

الساعة في الصندوق

بدأ الجدل العظيم بين بور وأينشتاين حول تفسير نظرية الكم عام ١٩٢٧ في مؤتمر سولفاي الخامس واستمر حتى وفاة أينشتاين عام ١٩٥٥، وراسل أينشتاين بورن حول الموضوع، ومن الممكن التقاط بعض من هذا الجدل من خطابات بورن-أينشتاين. دار محور هذا الجدل حول سلسلة من الاختبارات الخيالية للتنبؤ بتفسير كوبنهاجن، ليست تجارب حقيقية أجريت في المعمل لكنها «تجارب ذهنية». حاول أينشتاين في هذه اللعبة أن يفكر في تجربة يمكن فيها نظريًّا قياس شيئين مكملين في اللحظة نفسها — مثل موقع وكتلة الجسيمة أو طاقتها — بدقة عند زمن محدد، وهكذا، وعندئذ حاول بور وبورن أن يظهرا أن تجربة أينشتاين الذهنية لا يمكن ببساطة إجراؤها بالطريقة المطلوبة لسحب البساط من تحت أقدام النظرية، وتجربة «الساعة في الصندوق» هي أحد الأمثلة التي ستبين كيف أُجريت اللعبة.

قال أينشتاين: تخيل صندوقًا به ثقب في أحد جدرانه مغطى بحاجز يمكن فتحه ثم إغلاقه ثانية بتحكم من ساعة داخل الصندوق، وبجانب الساعة وآلية فتح وإغلاق الثقب فالصندوق مليء بالإشعاع. جهز التجربة بحيث يُفتح غطاء الثقب عند لحظة معينة حُدِّدَت مسبقًا بواسطة الساعة ليسمح بمرور فوتون واحد ليهرب قبل أن يغلق ثانية. زن الصندوق في البداية ثم اسمح للفوتون بالهرب ثم زن الصندوق ثانية، ولأن الكتلة هي



شكل ٩-١: تجربة الساعة في الصندوق. المعدات المطلوبة لجعل التجربة قابلة للإجراء عمليًّا (أوزان وياي وغيرها) تجعل من المستحيل دائمًا إزاحة عدم التيقن من قياس الطاقة والزمن معًا (انظر المتن).

طاقة، فالفرق بين الوزنين سيدلنا على طاقة الفوتون الذي هرب، وعليه فإننا — من حيث المبدأ — سنعرف كمية طاقة الفوتون بالضبط والزمن الذي استغرقه الفوتون للمرور خلال الثقب، داحضين بذلك مبدأ عدم التيقن.

فاز بور هذا اليوم، كما كان يحدث دائمًا في مثل هذه المناقشات، عندما نظر إلى التفاصيل العملية لإمكانية إجراء القياسات، فلا بد من وزن الصندوق مما يتطلب تعليقه بواسطة ياي مثلًا، واقع تحت تأثير مجال الجاذبية، وقبل أن يهرب الفوتون من الصندوق يسجل الشخص الوهمي الذي يجري التجربة موقع المؤشر المثبت بقوة على المقياس، وبعد أن يهرب الفوتون يمكن لهذا الشخص من حيث المبدأ أن يضيف أوزانًا للصندوق ليعيد المؤشر إلى ما كان عليه، ويتضمن هذا نفسه علاقات عدم التيقن. ويمكن تحديد موقع المؤشر في حدود وصفتها علاقات هايزنبرج، وهناك

عدم تيقن في كمية حركة الصندوق مرتبطة بعدم التيقن هذا في موضع المؤشر؛ فكلما زادت درجة الدقة في قياس وزن الصندوق زاد عدم التيقن لكل المعرفة الهامة لكمية حركته، وحتى إذا حاولت إعادة الموقف إلى ما كان عليه بإضافة أوزان صغيرة للصندوق ليعود الياى لموضعه الأصلي، وحساب الوزن الزائد لتغيير طاقة الفوتون الهارب، فإنك لن تستطيع أفضل أبدًا من اختزال عدم التيقن إلى الحدود المسموح بها في علاقة هايزنبرج، وفي هذه الحالة $\Delta E \Delta t > \hbar$.

وتوجد هذه التفاصيل وتفاصيل تجارب ذهنية أخرى تضمنتها مناقشات أينشتاين-بور في كتاب أبراهام بي رقيق هو الرب ... أكد بي أنه ليس هناك شيء غريب في إصرار بور على ذكر الوصف الكامل والتفصيلي للتجارب الخيالية، وفي هذه الحالة تُستخدم صواميل ومسامير لتثبيت إطار الميزان في موضعه، والياى الذي يسمح بقياس الكتلة لا بد أن يسمح للصندوق بالحركة، وبإضافة الأوزان الصغيرة الضرورية، وهكذا، ولا بد من تفسير نتائج كل هذه التجارب بمدلول مصطلحات اللغة الكلاسيكية، لغة الواقع اليومي. ومن الممكن تثبيت الصندوق في مكانه تمامًا، وعليه فلن يكون هناك عدم تيقن حول الموقع، لكن سيكون من المستحيل قياس التغير في الكتلة، وتنشأ معضلة عدم تيقن الكم لأننا نحاول أن نعبر عن الأفكار الكمية بلغة حياتنا اليومية، ولذلك أصرّ بور على استخدام المسامير والصواميل في تجاربه.

تناقض EPR

تناقض (أينشتاين وبودولسكي وروزين)

تقبل أينشتاين انتقادات بور لهذه التجربة ولتجارب ذهنية أخرى، وفي أوائل ثلاثينات القرن العشرين تحول أينشتاين إلى نوع جديد من الاختبارات الخيالية لقواعد الكم. كانت الفكرة الأساسية لهذا المدخل الجديد هو استخدام معلومات تجريبية لجسيمة واحدة لاستنتاج خصائص مثل الموقع وكمية الحركة لجسيمة أخرى، ولم يُحل هذا النوع من الجدل أبدًا في حياة أينشتاين، ولكن جرى اختباره بنجاح الآن ليس عن طريق التجارب الفكرية المحسنة

بل عن طريق تجارب حقيقية في المعمل، ومرة أخرى يفوز بور ويخسر أينشتاين.

كانت حياة أينشتاين الشخصية في السنوات الأولى من ثلاثينات القرن العشرين غير مستقرة؛ فكان عليه أن يغادر ألمانيا، خوفًا من إدانته من قبل النظام النازي، وبحلول سنة ١٩٣٥ كان قد استقر في برينستون، وفي ديسمبر سنة ١٩٣٦ ماتت زوجته الثانية إلزا بعد صراع طويل مع المرض.

واصل أينشتاين مع كل هذا الاضطراب مناوشاته حول تفسير نظرية الكم، مع أنه هُزم بدفوع بور، إلا أنه لم يقتنع في قلبه بأن تفسير كوبنهاجن وملحقاته من عدم التيقن وغيبة السببية الصارمة لها الكلمة الأخيرة كوصف صحيح للعالم الحقيقي، وقام ماكث جامر بوصف اللف والدوران لما يدور بخلد أينشتاين حول هذا الموضوع باستفاضة في كتاب «فلسفة ميكانيكا الكم». تجمع العديد من الخيوط في سنتي ١٩٣٤، ١٩٣٥ عندما عمل أينشتاين مع بوريس بودولسكى وناثان روزين في بحث عرضوا فيه ما أصبح يعرف بعنوان «تناقض EPR»* مع أن هذا البحث لا يصف في الواقع أي تناقض على الإطلاق.[†]

كانت نقطة الجدل، وفقًا لأينشتاين ومساعديه، أن تفسير كوبنهاجن لا بد أن يكون منقوصًا، ولا بد من وجود شيء ما يجعل عمل الساعة التي تحرك الكون مستمرة، وهذا فقط هو ما يعطي الانطباع بعدم التيقن وعدم التنبؤ على المستوى الكمي خلال التغيرات الإحصائية.

قال أينشتاين وبودولسكي وروزين: تخيل جسيميتين تتداخل كل منهما مع الأخرى ثم تبعدان عن بعضهما، ولا تتداخلان مع أي شيء آخر حتى لحظة أن يقرر الشخص الذي يجري التجربة أن يفحص إحداهما، ولكل جسيمة كمية حركة خاصة بها وتقع كل منهما في موقع ما في الفضاء،

---

* EPR الحروف الأولى من أسماء المؤلفين الثلاثة (المترجمان).

† أ. أينشتاين، وب. بودولسكى، ون. روزين «هل يمكن اعتبار وصف ميكانيكا الكم للواقع الكيميائي شاملًا؟» Physical Review 47، صفحات ٧٧٧–٧٨٠، سنة ١٩٣٥. وقد أعيد طباعة هذا البحث في مجلد «الواقعية الفيزيائية» المحرر س. تولمين، ودار نشر هاربرورو ١٩٧٠.

وحتى بالنسبة لقواعد نظرية الكم فإنه مسموح لنا بقياس كمية الحركة الكلية للجسيمتين معًا بدقه، بالإضافة إلى المسافة بينهما عندما كانتا قريبتين من بعضهما. وعندما نقرر قياس كمية الحركة لإحداهما بعد فترة طويلة فإننا نعلم تلقائيًّا ما يجب أن تكون عليه كمية حركة الجسيمة الأخرى، حيث إن المجموع لا يجب أن يتغير، وبدلًا من ذلك نستطيع قياس الموقع الدقيق للجسيمة الأولى، وبنفس الأسلوب نستنتج موقع الجسيمة الأخرى. والآن قد ندفع بأن القياسات الفيزيائية لكمية الحركة للجسيمة A تدمر معرفة موقعها الخاص، ومن ثم لن نستطيع أن نعرف موقعها بالضبط، وكذلك بالمثل، فالقياسات الفيزيائية لموقع الجسيمة A يتسبب في اضطراب كمية حركتها، التي ستظل غير معلومة، ولكن الأمر قد يبدو مختلفًا تمامًا لأينشتاين ورفاقه ليدفعوا بأن حالة الجسيمة B تعتمد على أي من القياسين نختار أن نجري على الجسيمة A. كيف للجسيمة B أن «تعرف» هل يجب أن يكون لها كمية حركة محدودة بدقة أو موقع محدد بدقة؟ ويبدو في عالم الكم أن إجراء قياسات على جسيمة «هنا» تؤثر على شريكتها «هناك» وهذا يخالف السببية، وهو «الاتصال» التلقائى عبر الفضاء، وهو شيء ما يُدْعى «الفعل عن بعد».

انتهى بحث EPR بأنه إذا تقبلنا تفسير كوبنهاجن، فإنه «يجعل واقعية [الموقع وكمية الحركة للنظام الثاني] يعتمد على عملية القياس التي أجريت على النظام الأول، الأمر الذي لن يؤثر في النظام الثاني بأي شكل، ولا يوجد تعريف معقول للواقعية نتوقع أن يسمح بذلك.»* ويمثل هذا أين حاد ذلك الفريق عن زملائهم وعن كل مدرسة كوبنهاجن. لم يعترض أحد على منطق المناقشة، لكنهم اعترضوا على ما يكوِّن تعريف «معقول» للواقعية. استطاع بور ورفاقة أن يتعايشوا مع واقعية فيها موقع وكمية حركة الجسيمة الثانية ليس لهما معنى موضوعيّ إلى أن يحدث قياسهما بصرف النظر عمّا تم على الجسيمة الأولى. وليس هناك من شك أنه لا بد من الاختيار

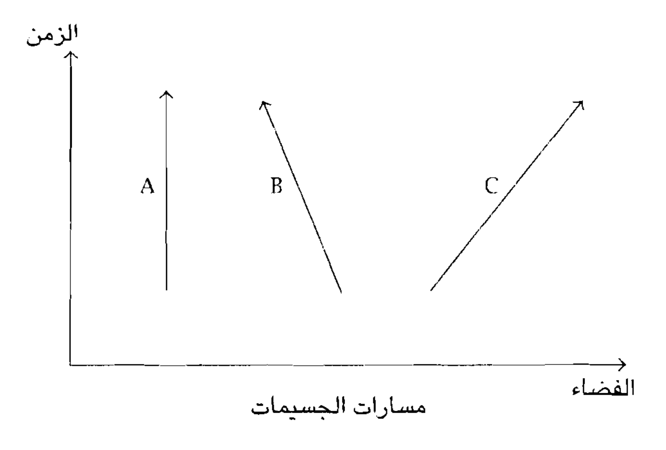
* مقتبس من Pais ص٤٥٦.

بين الواقعية الموضوعية وعالم الكم، لكن أينشتاين ومعه مجموعة أقلية ظلوا على موقفهم، فإذا كان لا بد من الاختيار بين الاثنين، فاختيار الواقع الموضوعي ورفض تفسير كوبنهاجن.

لكن أينشتاين كان رجلًا شريفًا ومستعدًّا دائمًا لتقبل الأدلة التجريبية المقنعة، فإذا قدر له أن يعيش ليرى الاختبارات التجريبية الحديثة التي بينت بجلاء خطأ تأثير EPR، كان سيميل للاعتراف بخطئه؛ فالواقعية الموضوعية ليس لها مكان في الوصف الأساسي للعالم، لكن الفعل عن بعد أو اللاسببية لها مثل هذا المكان، ولذلك فإن التحقق التجريبي من الأهمية بحيث يستحق أن نخصص له فصلًا قائمًا بذاته. ولكن أولًا، في الختام، يجب أن نلقي نظرة على بعض الاحتمالات المتناقضة الموروثة في قواعد الكم؛ الجسيمات التي تسافر إلى الوراء في الزمن، وأخيرًا قطة شرودنجر الشهيرة نصف الميتة.

السفر عبر الزمن

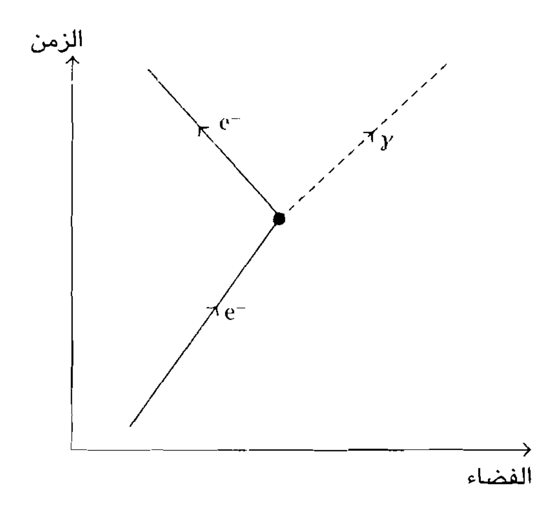
غالبًا يستخدم الفيزيائيون أداة بسيطة لتمثيل حركة الجسيمات خلال الزمان والمكان مثل قطعة من الورق أو سبورة، والفكرة ببساطة هي تمثيل سريان الزمن في اتجاه أعلى الصفحة من أسفل إلى أعلى والحركة في الفضاء عبر الصفحة، ويقلص هذا الأبعاد الفراغية الثلاثة في بعد واحد، لكن ينتج عنه نسق مألوف توًّا لأي إنسان تعامل مع الشكل البياني حيث يعبر عن الزمن بمحور «y» والفضاء بمحور «x». ظهرت هذه الأشكال البيانية للزمكان كأداة لا تقدر بثمن للفيزياء الحديثة في النظرية النسبية، التي يمكن استخدامها لتمثل الكثير من غرائب معادلات أينشتاين بمصطلحات هندسية، التي هي في بعض الأحيان أسهل في التناول وغالبا تكون أسهل في الفهم، ولقد استخدمت في فيزياء الجسيمات بواسطة ريتشارد فينمان في الأربعينيات من القرن العشرين، وفي هذا المضمون عادة تسمى «أشكال فينمان» في عالم الكم للجسيمات، ويمكن استبدال تمثيل الزمان والمكان بمدلول كمية الحركة والطاقة، وهو ما يناسب أكثر عند التعامل مع التصادمات بين الجسيمات، لكنني سألتزم هنا بوصف الزمكان البسيط.



شكل ٩-٢: حركة جسيمة خلال الزمان والمكان يمكن تمثيلها «كخط عالم».

ويمثل الخط في شكل فينمان مسار الإلكترون. فالإلكترون الذي يقبع في مكانه ولا يتحرك أبدًا يعطي خطًّا يتحرك إلى أعلى الصفحة معبرا عن حركة في اتجاه الزمن فقط، أما الإلكترون الذي يغير من مكانه ببطء، والذي يتحرك كذلك مع سريان الزمن يمثله خط بزاوية ميل ضئيلة بالنسبة للخط الرأسي، لكن الإلكترون الذي يتحرك بسرعة فإنه يكوِّن زاوية أكبر مع «خط العالم» لجسيمه ثانية، ويمكن أن تكون الحركة في الفراغ في أي من الاتجاهين اليسار أو اليمين، وربما يكون الخط هنا متعرجًا إذا حاد الإلكترون نتيجة التصادم مع جسيمات الأخرى، ولكن في عالمنا اليومي أو في أشكال عالم الزمكان البسيط في النظرية النسبية فإننا لن نتوقع لخط العالم أن يرجع للخلف ويتقدم إلى أسفل الصفحة لأن هذا سيعني التحرك إلى الوراء في الزمن.

وإذا التزمنا بالإلكترون كمثال للتعامل نستطيع أن نرسم شكل فينمان البسيط مبينًا كيف يتحرك الإلكترون عبر الزمان والمكان ويتصادم بفوتون ويغير من اتجاهه، وعندئذ يبعث بفوتون ويرتد في اتجاه آخر، والفوتونات في هذا الوصف لمسلك الجسيمة لها أهمية عظمى لأنها تعمل كحاملة للقوى

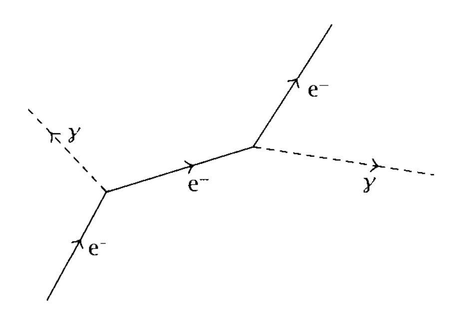


شكل ٩-٣: يتحرك الإلكترون خلال المكان والزمان ويطلق فوتونا (أشعة γ) ويرتد بزاوية.

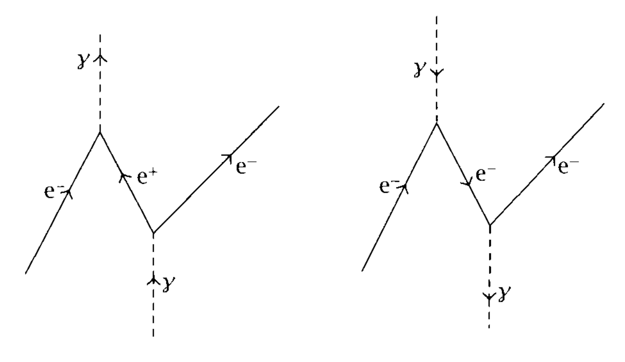
الكهربية؛ فعندما يقترب إلكترونان أحدهما من الآخر فإنهما يتنافران ويتحركان بعيدًا أحدهما عن الآخر مرة ثانية وذلك بسبب القوى الكهربية بين الشحنات المتماثلة. ويعرض شكل فينمان مثل هذا الحدث: خطًّا عالم للإلكترون يتقابلان فيترك عندها الإلكترون فوتونًا (الذي يرتد مبتعدًا) ويمتصه إلكترون آخر (الذي يندفع في الاتجاه الآخر).*

والفوتونات هي حاملة للمجال الكهربي، لكنها تستطيع القيام بما هو أكثر من ذلك، وقد بين ديراك أن الفوتون الذي يحمل طاقة كافية يمكن أن ينتج إلكترونًا وبوزتيرونًا من الفراغ محولًا طاقته إلى كتلتهما. وسيصبح البوزتيرون (ثقب إلكترون ذا طاقة سالبة) قصير العمر لأنه من المتوقع أن

* وهذا بالطبع تبسيط عظيم، ويجب أن نتصور في الواقع إلكترونين يتبادلان العديد من الفوتونات عندما يتداخلان. وبنفس الطريقة سأشير هنا إلى «الفوتون» الذي يكون زوجًا من بوزيترون/إلكترون، أما في الحقيقة فإننا نتعامل مع أكثر من فوتون واحد، وربما مع زوج من أشعة جاما المتصادمة أو حتى مع موقف أكثر تعقيدًا.



شكل ٩-٤: جزء من تاريخ الإلكترون متضمن التداخل مع زوج من الفوتونات.



شكل ٩-٥: إلى اليسار تنتج أشعة جاما زوجًا من إلكترون/ بوزتيرون ويقابل البوزيترون فيما بعد إلكترونًا ويتلاشيا معًا ويكوِّنا فوتونًا آخر. وإلى اليمين، يتحرك إلكترون منفرد بشكل متعرج عبر الزمكان ويتداخل مع فوتونين تمامًا كما في شكل ٩-٤. ولكن في جزء من حياته، يتحرك هذا الإلكترون للوراء في الزمان. وهاتان الصورتان متكافئتان رياضيًّا.

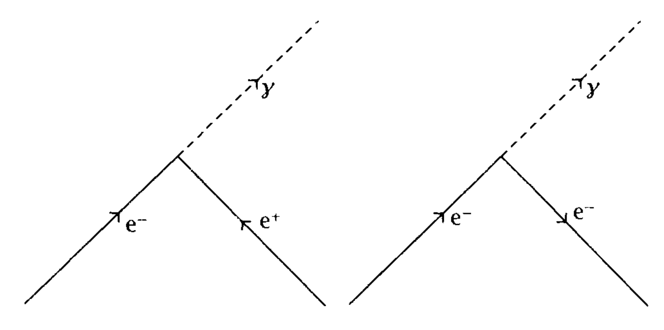
يلتقي بإلكترون في الحال ويتلاشى الاثنان في شكل جرعة طاقة إشعاعية، وللتبسيط يمكن تمثيل هذه الطاقة بفوتون مفرد.

ومرة أخرى، يمكن تمثيل التداخل الكلي ببساطة في شكل فينمان، فالفوتون الذي يرحل عبر الزمان والمكان يكون تلقائيًّا زوجًا من إلكترون

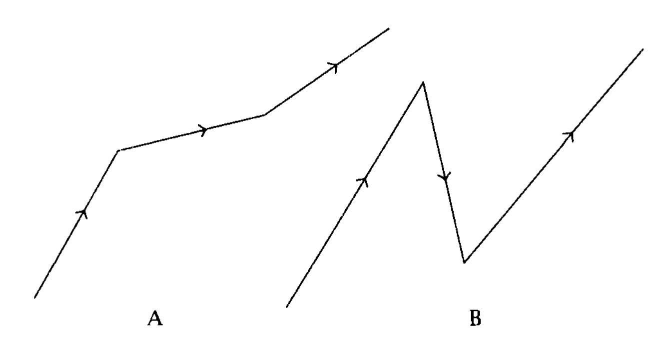
وبوزيترون، ويتحرك الإلكترون في مساره ويقابل البوزيترون إلكترونًا آخر ويتلاشيا ويترك الساحة فوتون آخر. لكن الاكتشاف الدرامي الذي توصل إليه فينمان سنة ١٩٤٩ هو أنه في وصف الزمكان فإن البوزيترون المتحرك إلى الأمام في الزمان يكافئ تمامًا الوصف الرياضي لتحرك إلكترون إلى الخلف في الزمان على مسار شكل فينمان نفسه. وبالإضافة إلى أن الفوتونات هي نفسها جسيماتها المضادة فليس هناك اختلاف في هذا الوصف بين فوتون يتحرك إلى الأمام في الزمان وآخر يتحرك إلى الوراء في الزمان. ولكل الأغراض العملية يمكن أن نمحو أسهم مسار الفوتون في الشكل ونعكس مسار البوزيترون لنجعله إلكترونًا. ويدلنا شكل فينمان نفسه على قصة أخرى، عندما يتقدم إلكترون عبر الزمان والمكان ويقابل فوتونًا عالي الطاقة، فإنه يمتصه ثم يتشتت إلى الخلف في الزمان حتى يطلق فوتونا نشطًا آخر، ويرتد بطريقة ما إلى الأمام في الزمان مرة أخرى، وبدلًا من ثلاث جسيمات، إلكترونان وبوزيترون في رقصة معقدة، يصبح لدينا جسيمة واحدة، إلكترون يتحرك بشكل متعرج عبر الزمان والمكان متصادما مع الفوتونات هنا وهناك خلال مساره. وبمدلول هندسة الأشكال فإن هناك تشابهًا واضحًا بين مثال الإلكترون الذي يمتص فوتونًا ذا طاقة منخفضة ويغير من مساره قليلًا ثم ينبعث منه فوتون ويغير من اتجاهه مرة أخرى، وبين الإلكترون الذي يتشتت بعنف عند التداخل مع فوتون يتحرك إلى الوراء في الزمن أثناء فترة معينة من حياته، وهناك خط متعرج في كلتا الحالتين له ثلاث مقاطع مستقيمة وزاويتان. والاختلاف هنا فقط أنه في الحالة الثانية تكون الزوايا أكثر حدة عنها في الحالة الأولى، وكان جون ويلر أول من امتلك البصيرة ليقول إن النمطين المتعرجين يمثلان النوع نفسه من الأحداث، لكن فينمان كان أول من برهن على التطابق الرياضي المضبوط بين الحالتين.

وهناك الكثير لاستيعابه أكثر حتى مما تقابله العين للوهلة الأولى، لذا دعونا نأخذ الأمر ببطء، قطعة قطعة:

أولًا: لقد ألقيت بهذه الملحوظة حول أن الفوتون هو نفسه جسيمته المضادة ولهذا نستطيع أن نزيل الأسهم من مسارات الفوتون، فالفوتون



شكل ٩-٦: على العموم يمكن كذلك وصف تلاشى زوج من جسيمة وجسيمة مضادة كحدث تشتت عنيف لدرجه أنه يبعث بالجسيمة إلى الوراء.



شكل ٩-٧: أرسى ريتشارد فينمأن التكافؤ الرياضى لكل أشكال الزمكان ذات الإنثناء المزدوج.

الذي يتحرك إلى الأمام في الزمان هو نفسه الفوتون المضاد الذي يتحرك إلى الوراء في الزمان، ولكن الفوتون المضاد هو فوتون كذلك، وعليه فإن الفوتون المتحرك للأمام في الزمان هو نفسه فوتون متحرك إلى الوراء في الزمان، فهل هذا غريب عليك؟ يجب أن يكون الأمر كذلك. وبعيدًا عن أي شيء آخر، فإن هذا يعني أننا عندما نرى ذرة في حالة مثارة تنبعث منها طاقة وتسقط إلى الحالة الأرضية المستقرة، فإنه يمكن القول هنا إن طاقة كهرومغناطيسية تتحرك للوراء في الزمان ووصلت للذرة محدثة الانتقال. وليس هذا من السهل

تصوره لأننا الآن لا نتكلم عن فوتون بمفرده يتحرك في خط مستقيم عبر المكان بل نتحدث عن غلاف كروي من الطاقة الكهرومغناطيسية المتمدد، وجبهة موجة تنتشر من الذرة في جميع الاتجاهات وتتشوه وتتشتت أثناء سيرها، وينتج عن عكس هذه الصورة عالم به جبهة موجة كروية الشكل تمامًا متمركزة حول ذرتنا المختارة، لا بد أن تنشأ بواسطة الكون ناتجة من سلسلة من عمليات التشتت تعمل معًا ثم تتجمع لتتقارب على هذه الذرة المعنية.

ولا أود أن أستغرق بعمق في هذا النوع من التفكير لأن هذا سيبعدنا عن نظرية الكم ويدخلنا في علم أصل الكون؛ الكوسمولوجيا. لكنها تحمل تضمينات عميقة لمفهومنا عن الزمان، ولماذا نرى الزمان ينساب في اتجاه واحد فقط. وببساطة شديدة فإن أي شعاع ينطلق من ذرة سيمتص بواسطة ذرة أخرى فيما بعد، وهذا محتمل فقط لأن معظم الذرات الأخرى موجودة في حالتها المستقرة، الأمر الذي يعني أن مستقبل الكون سيكون باردًا، وعدم التماثل هذا الذي نراه كسهم للزمن هو عدم التماثل بين الحقب الأبرد والحقب الأسخن للكون. ومن الأسهل أن ننسق لمستقبل أبرد لإجراء الامتصاص اللازم إذا كان الكون متمددًا لأن التمدد نفسه له تأثير بارد، ونحن نعيش بالفعل في كون متمدد، ولذلك فطبيعة الكون كما نراه الآن مرتبطة بشكل وثيق بطبيعة الكون المتمدد.*

زمان أينشتاين

لكن ما الذي «يراه» الفوتون نفسه كسهم للزمن؟ نحن نعرف من النظرية النسبية أن الساعات المتحركة تسير ببطء وأنها تسير بسرعة أبطأ عندما تتحرك مقتربة من سرعة الضوء، وبالفعل عند سرعة الضوء يتوقف الزمان

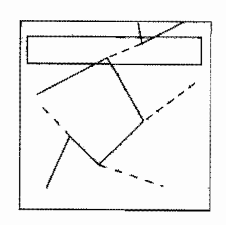
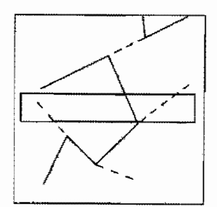
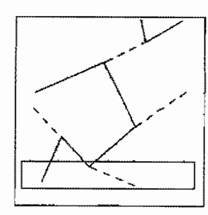
---

* وقد نوقشت هذه الأفكار بتفصيل أكثر ولكن بلغة أكثر وضوحًا وغير رياضية في الفصل السادس من كتاب جايانت فارليكار «بنية الكون» دار نشر جامعة أكسفورد ١٩٧٧. وقد ذهب بول ديفز إلى تفاصيل أكثر في «المكان والزمان في الكون الحديث» (دار نشر جامعة كمبريدج ١٩٧٧) ومن الممكن أن تجد بعض الرياضيات في «الحتمية النهائية للكون» تأليف ج. ف. إسلام (دار نشر جامعة كمبريدج ١٩٨٣).

ساكنًا فتتوقف الساعة. يتحرك الفوتون طبيعيًّا بسرعة تعادل سرعة الضوء، وهو ما يعنى أن الزمن لا يعنى شيئًا للفوتون؛ فالفوتون الذي يترك نجمًا بعيدًا ويصل إلى الأرض قد يستغرق في هذه الرحلة آلاف السنين إذا قيس ذلك بساعات الأرض، ولكنه لا يستغرق أي زمن على الإطلاق بالنسبة للفوتون نفسه، وقد يكون الفوتون الموجود من الخلفية الإشعاعية الكونية من وجهة نظرنا قد قطع نحو ١٥ ألف مليون سنة من الانفجار الكبير الذي بدأ به الكون الذي نعرفه، لكن الانفجار الكبير وحاضرنا تعني الزمان نفسه بالنسبة للفوتون. وليس هناك سهم في مسار الفوتون في شكل فينمان، ليس فقط لأن الفوتون هو نفسه جسيمته المضادة لكن لأن الحركة عبر الزمان بالنسبة للفوتون ليست ذات معنى، ولهذا فإن الفوتون هو جسيمته المضادة.

فشل المتصوفون ومبسطو الأمور الذين يبحثون في مساواة الفلسفة الشرقية بالفيزياء الحديثة في الوصول إلى هذه النقطة، وهي النقطة التي تخبرنا أن كل شيء في الكون، الماضى والحاضر والمستقبل متصل بكل شيء آخر بشبكة من الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي «يرى» كل شيء في اللحظة نفسها، ومن الطبيعي أن الفوتونات يمكن أن تخلق وأن تدمر ولذلك فإن الشبكة ليست مكتملة، لكن مسار الفوتون في الواقع خلال الزمكان ربما يربط بين عيني وبين النجم القطبي، ولا توجد حركة حقيقية في الزمان ترى مسارًا يتطور من النجم إلى عيني، هذا مجرد إدراك حسي من وجهة نظري. وهناك وجهة نظر أخرى لها نفس القدر من الصلاحية ترى المسار كسمة أبدية يتغير حولها الكون، وأحد الأشياء التي تحدث خلال هذه التغيرات في الكون أنه قد توجد عيني والنجم القطبي عند نهايتين متضادتين للمسار.

وماذا عن مسارات الجسيمات الأخرى في أشكال فينمان؟ وإلى أي مدى كونها «واقعية»؟ يمكننا أن نقول الشيء نفسه تقريبًا عنهم؛ تصور شكل فينمان وهو يحتوي على كل الزمان والمكان وبه مسار لكل جسيمة موجودة بداخله، تصور الآن مشاهدة ذلك الشكل من خلال شق ضيق يسمح فقط

شكل ٩-٨: لو أن كل مسارات الجسيمة ثبتت بشكل ما في الزمكان فربما نرى حركة وتداخلًا خادعين عندما يتحول إدراكنا من الآن (الصورة في الجانب الأيمن) للأمام خلال الزمن وإلى أعلى في الصفحة، فهل تراقص الجسيمات مجرد خدعة سببها إدراكنا الحسي لسريان الزمان؟

لشريحة محدودة من الزمن يجري تتبعها، وحركّ الشق بثبات في اتجاه أعلى الصفحة، سنرى خلال الشق رقصة معقدة لجسيمات متداخلة، وتكوُّن أزواج وتلاشيات، وأحداث أكثر تعقيدًا بصورة كبيرة، وبانوراما لتغير دائم، إلا أن كل ما نفعله هو ملاحظة شيء ما مثبت في المكان والزمان. إن إدراكنا الحسي هو الذي يتبدل وليس الواقع الأساسي، ولأننا نثبت أنظارنا على شق يتحرك بثبات فإننا نرى بوزيترون يتحرك إلى الأمام بدلًا من إلكترون يتحرك إلى الوراء في الزمن، لكن كلا التفسيرين حقيقيان بالقدر نفسه، ولقد ذهب جو ويلر ابعد من ذلك مشيرًا إلى أننا يمكن أن نتخيل جميع الإلكترونات في الكون مرتبطة بعضها ببعض عن طريق تداخلات لتشكل ممرًا متعرجًا غاية في التعقيد خلال الزمكان إلى الأمام وإلى الخلف. كان ذلك جزءًا من ومضة الإلهام الأصلية التي أدت إلى بحث فينمان الحاسم — صورة «الإلكترون المنفرد الذي يتحرك للخف وللأمام، وللخلف وللأمام، وللخلف وللأمام على طيف الزمن لينسج نسيجًا غنيًّا»، ربما يحتوي على جميع الإلكترونات والبوزيترونات في العالم وفي صورة مثل هذه سيكون كل إلكترون ببساطة في كل مكان في الكون جزءًا مختلفًا لخط عالم واحد فقط، خط العالم الوحيد لإلكترون «حقيقي».

ولا تصلح هذه الفكرة في عالمنا، ولكي نجعلها صالحة يجب أن نتوقع أن نجد عددًا من الشرائح المنعكسة لخط العالم، وعددًا من البوزيترونات مساويًا لعدد الشرائح الأمامية؛ إلكترونات. وفكرة أن الواقع الثابت لنظرتنا أنه الشيء الوحيد المتغير ربما لا تصلح عند هذا المستوى البسيط؛ فكيف يمكن أن نتوافق مع مبدأ عدم التيقن؟* ولكن هذه الأفكار معًا تقدم وضعًا أفضل لطبيعة الزمن مما تقدمه خبرتنا اليومية. وانسياب الزمن في حياتنا اليومية في العالم مؤشر إحصائي يسببه بصورة كبيرة تمدد الكون من حالة أكثر سخونة إلى حالة أكثر برودة، وحتى عند هذا المستوى فإن معادلات النسبية تسمح بالسفر عبر الزمان، ويمكن استيعاب هذا المفهوم بسهولة جدًا بمدّلول أشكال الزمكان.†

ويمكن أن تكون الحركة في الفضاء في أي اتجاه ثم العودة مرة ثانية. أما الحركة في الزمان فتسير في اتجاه واحد فقط في حياتنا اليومية بصرف النظر عما يحدث على مستوى الجسيمة، ومن الصعب أن تتصور أبعاد الزمكان الأربعة متعامدة على بعضها بزوايا قائمة، لكننا نستطيع إهمال احد الأبعاد الأربعة ونتصور ماذا تعني هذه القاعدة الصارمة إذا طبقتها على أحد الأبعاد الثلاثة التي تعودنا عليها. ويبدو الأمر وكأنه يسمح لنا بالحركة إما إلى أعلى وأسفل أو إلى الأمام وإلى الخلف، لكن الحركة إلى الجوانب مفيدة، فالحركة مثلًا قد تكون ممكنة لليسار فقط، أما الحركة إلى اليمين فممنوعة، فإذا جعلنا من ذلك القاعدة الأساسية في لعبة الأطفال وطلبنا من طفل أن يجد طريقة للوصول إلى جائزة على الجانب الأيمن (إلى الخلف في الزمان) فإن الأمر لن يستغرق طويلًا حتى يجد الطفل مخرجًا للخروج من هذا المأزق. يدور ببساطة حول نفسه ليواجه الجانب الآخر

* ذهب فينمان في الواقع أبعد كثيرًا مما قمت بتوضيحه في هذا العرض البسيط، وطور معالجة لخطوط العالم تتضمن احتمالات، وعليه حصل على نسخة جديدة لميكانيكا الكم التي سرعان ما بين فريمان دايسون أنها تكافئ تمامًا النسخ الأصلية للنظرية في نتائجها، ولكنها برهنت منذ ذلك الحين على أنها أداة رياضية أكثر قوة، وسيأتي المزيد حول ذلك فيما بعد.

† إن كتابي عن «التواء المكان» به تفاصيل أكثر عن تضمينات النظرية النسبية عن فهمنا للكون من تضمينات عن السفر عبر الزمن (ديلاكورت، نيويورك؛ وبليكان في لندن ١٩٨٣).

مبدلًا اليسار باليمين ثم يصل إلى الجائزة بأن يتحرك إلى اليسار. وبدلًا من ذلك ارقد على الأرض لتصبح الجائزة في الاتجاه «الأعلى» لرأسك. الآن تستطيع الحركة إلى «أعلى» لتقبض على الجائزة وإلى «أسفل» لتعود إلى مكانك الأصلي قبل أن تنهض لتقف مرة ثانية وتعود إلى اتجاهك الشخصي في الفضاء بالنسبة للمشاهدين.*

وتقنية السفر عبر الزمان التي تسمح بها النظرية النسبية مشابهة جدًا لذلك؛ فهي تتضمن تشويهًا لنسيج الزمكان لدرجة أنه في منطقة محلية من الزمكان يشير محور الزمان إلى اتجاه مكافئ لأحد اتجاهات المكان الثلاثة في المنطقة غير المشوهة في الزمكان، ويأخذ أحد هذه الاتجاهات الأخرى للمكان دور الزمان ويحدث ذلك بتبديل الزمان بالمكان، ومثل هذا الترتيب قد يجعل السفر في الزمان حقيقة، الأمر الذي يجعل السفر للأمام ثم للخلف مرة ثانية ممكنًا.

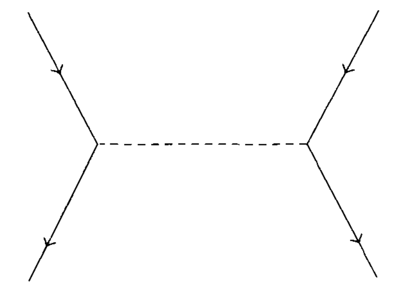
أجرى فرانك تبلر Frank Tipler، عالم الرياضيات الأمريكي الحسابات التي تبرهن على أن مثل هذه الحيلة ممكنة نظريًّا؛ فمن الممكن تشويه الزمكان بواسطة مجال جاذبية قوي، وآلة تبلر الخيالية للسفر عبر الزمن هي أسطوانة ذات كتلة كبيرة تحتوي على مادة تعادل ما في شمسنا معبأة في حجم طوله ١٠٠ كم ونصف قطره ١٠ كم وكثيف مثل كثافة النواة في الذرة، ويدور مرتين كل مللي ثانية، ويجر من حوله نسيج الزمكان. ويتحرك سطح الأسطوانة بسرعة تعادل نصف سرعة الضوء، هذا نوع من الأشياء التي لن يبنيها أكثر المخترعين جنونًا في ساحة منزله الخلفية، ولكن المقصود هنا أن ذلك مسموح به بواسطة كل قوانين الفيزياء التي نعرفها، وهناك جسم في الكون له كتلة شمسنا نفسها وكثافة نواة الذرة ويدور حول نفسه كل ١,٥ مللي ثانية، لكنه أبطأ ثلاث مرات من آلة تبلر للسفر عبر الزمن، ويدعى هذا «النابض ذو المللي ثانية» الذي اكتشف سنة ١٩٨٢،

* لقد حاولت هذه التجربة مع عدد قليل من الأطفال والبالغين، كل على حدة، وقد وجد نحو نصف الأطفال الحل، لكن القليل جدًا من البالغين هم الذين توصلوا لذلك. وقد اشتكى الذين لم يتوصلوا للحل أنه قد حدث غش، وللحقيقة، وطبقًا لمعادلات أينشتاين، فإن الطبيعة نفسها ليست فوق مستوى هذا النوع من الغش.

ومن المستبعد تمامًا أن يكون هذا الشيء أسطوانيًا؛ فمن المؤكد أن الدوران الشديد قد جعله مسطحًا على شكل فطيرة، ومع ذلك، فلا بد أن يكون هناك تشويه غريب للزمكان بالقرب منه. وربما لا يكون الزمن «الواقعي» للسفر مستحيلًا، لكنه مجرد غاية في الصعوبة وغير محتمل جدًّا جدًّا. وهذه النهاية الهشة لما يمكن أن يكون وتدًا صُمّم ليجعل اعتياد السفر عبر الزمان عند المستوى الكمي، على كل حال، يبدو أكثر قبولًا بقليل. وتسمح نظرية الكم والنظرية النسبية بنوع أو بآخر من السفر عبر الزمان، وأي شيء مقبول لتلك النظريتين لا بد أن يؤخذ مأخذ الجد مع ما يبدو عليه هذا الشيء من تناقض؛ فالسفر عبر الزمان في الواقع هو جزء لا يتجزأ من بعض السمات الغريبة في عالم الجسيمات، حيث يمكن فيها أن تحصل على شيء من لا شيء، إذا كنت سريعًا بما فيه الكفاية.

شيء من لا شيء

اقترح هيديكى يوكاوا Hideki Yukawa سنة ١٩٣٥، الذي كان في ذلك الوقت يبلغ من العمر ثمانية وعشرين عامًا ويعمل محاضرًا في الفيزياء بجامعة أوساكا، تفسيرًا لكيفية تماسك النيوترونات والبروتونات في نواة الذرة بالرغم من الشحنة الموجبة التي تميل إلى تفجير النواة بواسطة القوى الكهربية. ومن الواضح أنه لا بد من وجود قوة أقوى تتغلب على القوى الكهربية تحت الظروف المناسبة، وتحمل الفوتونات القوى الكهربية، وقد أقر يوكاوا أن هذه القوى النووية لا بد هي الأخرى أن تكون جسيمة. أصبحت الجسيمة تعرف «بالميزون» (وهي وسيط بين الإلكترون والبروتون ومن هنا جاء الاسم) وذلك باستخدام قواعد الكم للنواة، والميزونات مثل الفوتونات، هي الأخرى بوزونات لكن بــ«سبين» (الحركة المغزلية) مقداره الوحدة وليس صفرًا، وتختلف عن الفوتونات في أن متوسط عمرها قصير جدًّا، ولهذا السبب فإنها لا ترى خارج النواة إلا تحت ظروف خاصة، وفي الوقت المناسب، اكْتُشِفَتْ عائلة من الميزونات ليست بالضبط كما تنبأ يوكاوا، لكن قريبة من تنبئه بما فيه الكفاية، لتبين أن فكرة تبادل الجسيمات

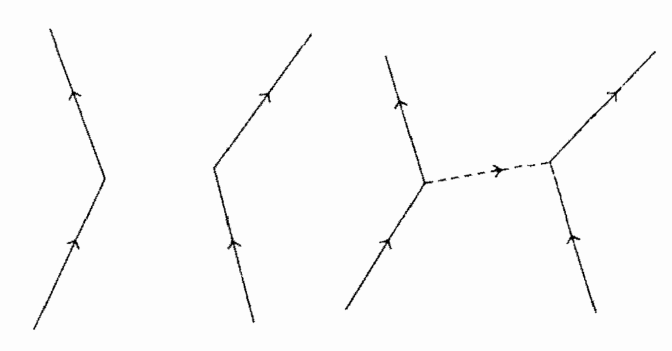


شكل ٩-٩: في مخطط فينمان، يتفاعل جسيمان عن طريق تبادل جسيم ثالث. وفي هذه الحالة الخاصة ربما يكون هناك إلكترونان يتبادلان فوتونا ويصدانه من واحد للأخر.

النووية للميزونات كحامل للقوى النووية القوية تعمل بشكل مشابه لتبادل الفوتونات كحامل للقوى الكهربية، وقد نال يوكاوا عن استحقاق جائزة نوبل في الفيزياء سنة ١٩٤٩.

وهذا التأكيد على أن القوى النووية مثل القوى الكهربية يمكن النظر إليها (تمامًا) بمدلول التداخل بين الجسيمات، هي حجر الزاوية لرؤية الفيزيائيين في العالم اليوم. وتعتبر كل القوى الآن تداخلات. ولكن من أين تجيء تلك الجسيمات التي تحمل التداخل؟ تجيء من لا مكان، أي التوصل إلى شيء من لا شيء، وفقًا لمبدأ عدم التيقن.

ينطبق مبدأ عدم التيقن على الخصائص التكميلية للزمان والطاقة، وينطبق أيضًا على الموقع وكمية الحركة؛ فكلما قل عدم التيقن بالنسبة للطاقة المتضمنة في حدث على مستوى الجسيمة زاد عدم التيقن لزمن هذا الحدث، والعكس صحيح، ولا يوجد إلكترون منعزل لأنه يستطيع أن يقترض طاقة من علاقة عدم التيقن لفترة وجيزة كافية من الزمن ويستخدم هذه الطاقة لتوليد فوتون، والعقبة هنا أنه بمجرد تكوُّن الفوتون لا بد له أن يُمتص ثانية بواسطة الإلكترون قبل أن «يلحظ» العالم أن الحفاظ على الطاقة قد انْتُهِك. وتوجد الفوتونات لجزء ضئيل جدًّا من الثانية — أقل من ١٠$^{-١٥}$ من الثانية — لكنها تظهر وتختفي طوال الوقت حول الإلكترونات،



شكل ٩-١٠: الفكرة القديمة عن «الفعل من على بعد» على اليسار وقد جرى استبدالها بفكرة الجسيمات كحاملات للقوة.

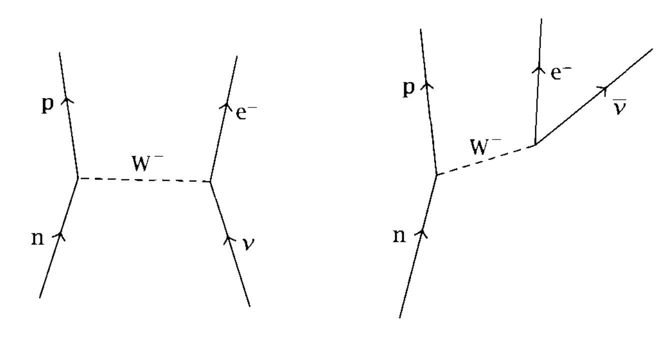
ويبدو الأمر وكأن كل إلكترون محاط بسحابة من الفوتونات «الخيالية» التي تحتاج فقط إلى دفعة صغيرة — كمية قليلة من الطاقة من الخارج لتهرب وتصبح واقعية — وعندما يتحرك إلكترون من حالة مثارة إلى حالة أقل إثارة في ذرة ما، فإنه يعطي الطاقة الزائدة لواحد من الفوتونات الخيالية ويجعله يطير حرًّا، فالإلكترون الذي يمتص طاقة يتصيد داخله فوتونًا حرًّا، ويقدم النوع نفسه من العمليات المادة اللاصقة التي تمسك بمحتويات النواة بعضها مع بعض.

وإذا تكلمنا بطريقة تقريبية، وحيث إن الكتلة والطاقة قابلتان للتبادل، فإن «مدى» أي قوى يتناسب عكسيًّا مع كتلة الجسيمة التي تُوجِد المادة اللاصقة أو مع كتلة أخف جسيمة إذا كانت العملية تتضمن أكثر من جسيمة، وحيث إن الفوتونات عديمة الكتلة فإن مدى القوى الكهرومغناطيسية ويكون نظريًّا لا حدود له مع أنها تصبح متناهية الصغر عند مسافة لانهائية بعيدًا عن الجسيمة المشحونة. وللميزونات الافتراضية ليوكاوا مثل هذا المدى الدقيق ويشار إليه بمدى القوى النووية القوية، ويجب أن تكون كتلتها ما بين ٢٠٠ إلى ٣٠٠ ضعف كتلة الإلكترون، وكجسيمات تعتبر الميزونات ثقيلة الكتلة، وقد وجدت الميزونات المعينة المتضمنة في التداخلات النووية القوية في الأشعة الكونية سنة ١٩٤٦ وأطلق عليها ميزونات pi أو بيونات. والبيون الذي لا

يحمل شحنة أي متعادل له كتلة مساوية لـ٢٦٤ مرة كتلة الإلكترون، وكل من البيون الموجب والسالب يزن ٢٧٣ ضعف كتلة الإلكترون. وبصورة عامة فهي لها سُبْع كتلة البروتون، إلا أن بروتونين يتماسكان معًا في النواة بالتبادل المتكرر للبيونات التي تزن جزءًا محسوسًا من وزن البروتون نفسه، دون أن تفقد البروتونات نفسها أي كتلة، وهذا ممكن فقط لأن البروتونات قادرة على أن تستفيد من مبدأ عدم التيقن. يتخلق البيون ثم يقابل بروتونًا آخر ويختفي، وكل ذلك في ومضة من عدم التيقن مسموح بها بينما الكون «لم يكن منتبهًا» ويمكن للبروتونات والنيوترونات — النوويات — أن تتبادل الميزونات فقط عندما تكون متقاربة جدًّا وبالضرورة عندما «تتلامس» إذا استخدمنا تعبيرًا غير ملائم من حياتنا اليومية، وإلا فإن البيونات الخيالية لن تستطيع عبور الفجوة خلال الزمن المسموح بواسطة مبدأ التيقن. وعليه فإن النموذج يشرح بشكل مفهوم جدًّا لماذا كان التداخل النووي القوي هو قوة ليس لها أي تأثير على النوويات خارج النواة ولها تأثير فعال جدًّا على النوويات داخل النواة.*

وهكذا فإن البروتون هو مركز سحابة من النشاط أكثر من الإلكترون، وفي حين يتحرك البروتون الحر في مساره عبر المكان (والزمان) فإنه يطلق ويعيد امتصاص فوتونات خيالية وميزونات خيالية، ولا تزال هناك طريقة أخرى للنظر إلى هذه الظاهرة: تخيل أن بروتونًا واحدًا فقط ينبعث منه بيون واحد فقط ويعاد امتصاصه، أمر بسيط، لكن لتنظر إلى ذلك بطريقة أخرى: أولًا هناك بروتون واحد، ثم بروتون واحد وبيون، وفي النهاية بروتون واحد مرة أخرى، ولأن البروتونات جسيمات لا يمكن تمييز بعضها عن بعض فإننا أحرار لأن نقول إن البروتون الأول قد اختفى وأعطى طاقة كتلته علاوة على القليل الذي اقترضه من مبدأ عدم التيقن ليكوِّن بيونًا وبروتونًا جديدًا، وفور ذلك تتصادم الجسيمتان وتختفيان لتكوِّنا في هذه العملية بروتونا

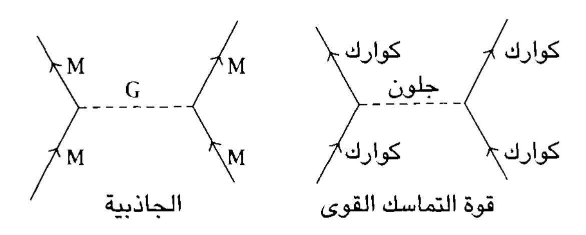
* أجرى يوكاوا حساباته في الواقع بطريقة عكسية، فقد كان يعرف مدى قوة القوى النووية القوية مما مكنه من وضع حدود على عدم التيقن للزمن المتضمن في تداخل النوويات، وقد أعطى هذا بدورة فكرة تقريبية عن الطاقة أو الكتلة للجسيمات التي تحمل (أو تتوسط) التداخل.



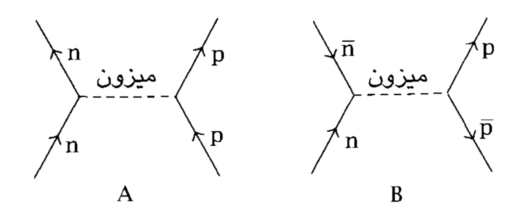
شكل ٩-١١: طريقتان مختلفتان للنظر إلى تداخل الجسيمة نفسها — بمجرد تغير نيوترينو داخل إلى نيوترينو مضاد خارج، وهذه عملية تفكك بانطلاق أشعة بيتا التي يتحول فيها النيوترون إلى بروتون وإلكترون ونيوترينو.

ثالثًا، وتحتفظ بتوازن الطاقة في الكون. ولماذا التوقف هناك؟ ولماذا لا يتنازل بروتوننا الأصلي عن طاقته مع القليل من الزيادة ليكوِّن نيوترونًا وبيونًا موجب الشحنة؟ هذا ممكن. ولماذا حينئذ لا يستطيع بروتون أن يتبادل هذا البيون الموجب الشحنة مع نيوترون «ليصبح» نيوترونًا، والنيوترون «يصبح» بروتونًا؟ وهذا أيضًا ممكن تمامًا، مثل إمكانية حدوث العمليات العكسية المتضمنة للنيوترونات و«هى تتحول» إلى بروتونات وبيونات سالبة الشحنة.

بدأت الأمور تتعقد الآن، حيث لا يوجد أي سبب للتوقف هنا، فبالمثل يمكن لبيون وحده أن يتحول إلى نيوترون وبروتون مضاد، وذلك لمدة قصيرة قبل أن يعود مرة أخرى لحالته الطبيعية، ويمكن أن يحدث هذا لبيون خيالي، الذي هو نفسه جزء من نسق فينمان المكون من بروتون أو نيوترون. ويمكن لبروتون أثناء تقدمه في طريقه أن ينفجر لينتج عن ذلك شبكة من الجسيمات الخيالية تطن وتتداخل جميعها بعضها مع بعض، ثم تخفت عائدة إلى ما كانت عليه، ويمكن النظر إلى جميع الجسيمات كناتج اتحاد جسيمات أخرى متضمنه فيما أطلق عليه فريتوف كابرا Capra



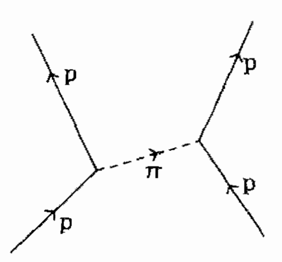
شكل ٩-١٢: يمكن تمثيل القوى الأساسية بمدلول تبادل الجسيمات، وفي هذه الأمثلة تتداخل جسيمتان كثيفتان (M) بتبادل الجرافينون (G)، ويتداخل كواركان بتبادل الجليون.



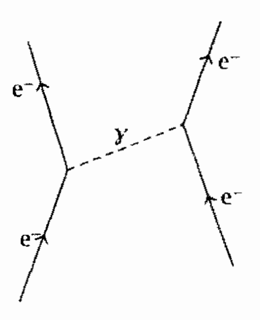
شكل ٩-١٣: وكالعادة فإن اتجاه الزمن في هذه الأشكال أمر اختياري، وفي الحالة A يتحرك نيوترون وبروتون إلى أعلى الصفحة متداخلين بتبادل ميزون. وفي الحالة B يتحرك نيوترون ونيوترون مضاد من اليسار إلى اليمين ليتقابلا ويتلاشيا وينتج ميزون، الذي يتفكك بدوره وينتج زوجًا من بروتون/بروتون مضاد. وتظهر مثل هذه «التفاعلات المتقاطعة» كيف أن مفاهيم القوى والجسيمات تصبح غير قابلة للتمييز فيما بينها.

Fritjof «الرقص الكونى»، ومازالت القصة لم تنته بعد. وحتى الآن لم نحصل على شيء من لا شيء، مع أننا قد حصلنا على الكثير مقابل القليل. والآن دعونا ندفع الأمور إلى أقصى ما يمكن.

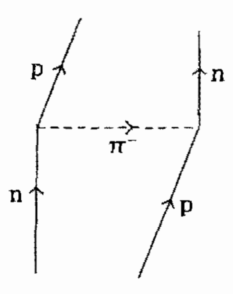
إذا كان هناك عدم تيقن متأصل للطاقة المتاحة لجسيمة لفترة قصيرة كافية من الزمن، فمن الممكن أن نقول أيضًا إن هناك عدم تيقن متأصل



شكل ٩-١٤: بروتونان يتنافران بعضهما من بعض بتبادل بيون.



شكل ٩-١٥: يتداخل إلكترونان بتبادل فوتون.

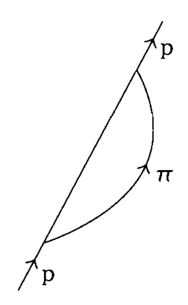


شكل ٩-١٦: بمساعدة بيون مشحون، يتحول نيوترون إلى بروتون بواسطة التداخل مع بروتون، الذي يصبح نيوترونا.

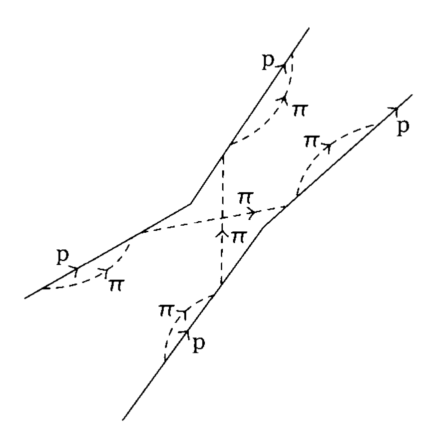
عما إذا كانت الجسيمة موجودة أم لا في زمن قصير كاف، آخذين في الاعتبار أن قواعد معينة مثل الحفاظ على الشحنة الكهربية، والتوازن بين

الجسيمات والجسيمات المضادة قد تم اتباعه. ليس هناك ما يوقف ظهور مجموعة من الجسيمات من لا شيء يتحد بعضها مع بعض ثم تختفي قبل أن يلاحظ الكون ككل هذا التعارض، وقد يظهر إلكترون وبوزيترون من لا شيء على الإطلاق بشرط أن يختفيا بسرعة كافية، ويمكن لبروتون وبروتون مضاد أن يفعلا نفس الشيء. ونستطيع القول بتحفظ شديد إن الإلكترون يستطيع فقط القيام بهذه الحيلة بمساعدة فوتون، وكذلك البروتونات بمساعدة ميزون ليقدما «التشتت» المطلوب. فالفوتون الذي ليس له وجود يكون زوجًا من بوزيترون/إلكترون الذي يتلاشى ليكون الفوتون الذي كان قد كونهما في بادئ الأمر، ولنتذكر: لا يعرف الفوتون الفرق بين الحاضر والمستقبل، وبالتبعية يمكن أن نتصور الإلكترون وهو يقتفى أثر ذيله في دوامة من الزمن؛ يظهر أولًا قافزًا من الفراغ كما يخرج الأرنب من قبعة الساحر، ثم يرحل إلى الأمام في الزمن لمسافة قصيرة قبل أن يلاحظ أنه أخطأ، معترفًا بعدم واقعيته فيعود مرة ثانية من حيث أتى — إلى الوراء عبر الزمن إلى نقطة البداية. وهناك يغير من اتجاهه مرة ثانية، وهكذا تتواصل الحلقة، وبمساعدة التداخل مع فوتون — حدث تشتت عالي الطاقة — عند كل «طرف» من الحلقة.

ووفقًا لأفضل نظرياتنا عن سلوك الجسيمات، فإن الفراغ ما هو إلا كتلة مضطربة من الجسيمات الخيالية في مكانها الصحيح، حتى إذا لم توجد جسيمات «واقعية». وهذه ليست مجرد طنطنة عديمة الجدوى بواسطة المعادلات، لأنه بدون السماح لتأثير تلك التقلبات الفراغية فإننا ببساطة لن نصل إلى الحل الصحيح للمشاكل المتضمنة لتشتت الجسيمات حيث يشتت بعضها بعضًا. وهذا دليل قوى على أن النظرية — المبنية مباشرة على علاقات عدم التيقن، لو نذكر — صحيحة؛ فالجسيمات الخيالية وتقلبات الفراغ أمر واقعي كباقي نظرية الكم؛ واقعي كازدواجية الموجة/الجسيمة، ومبدأ عدم التيقن، والفعل عن بعد، وفي عالم مثل هذا ليس من العدل مطلقًا أن نطلق على لغز قطة شرودنجر أنه تناقض بالمرة.



شكل ٩-١٧: يمكن للبروتون أن يكوِّن أيضًا بيونًا «خياليًّا» بشرط أن يعاد امتصاصه سريعًا.



شكل ٩-١٨: تنافر بروتونين بتبادل بيون يبدو أكثر تعقيدًا عما يظهر في شكل ٩-١٤.

قطة شرودنجر

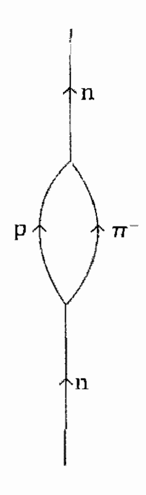
نشر تناقض القطة الشهير لأول مرة سنة ١٩٣٥ (مجلة Natur-wissen-schaften، المجلد ٢٣، صفحة ٨١٢) في السنة نفسها التي ظهر فيها بحث EPR. رأي أينشتاين في اقتراح شرودنجر أجمل وسيلة «تبين أن تمثيل المادة

بموجة هو تمثيل منقوص في الواقع»* وما زال الجدل حول EPR وتناقض القطة يدور في نظرية الكم حتى اليوم، ولكن بخلاف جدل EPR لم نصل إلى حل مقنع للجميع.

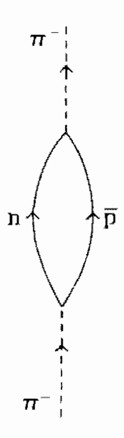
إلا أن المفهوم الذي وراء هذه التجربة الذهنية بسيط جدًّا: اقترح شرودنجر أننا يجب أن نتصور صندوقًا يحتوي على مصدر مشع وكشاف لتسجيل الجسيمات المشعة (ربما عداد جايجر) وزجاجة تحتوي على سم مثل السيانيد، وقطة حية، وقد رتبت الأدوات في الصندوق حتى يمكن تشغيل الكشاف لمدة كافية فقط لتحقق فرصة ٥٠٪ أن تتفكك إحدى الذرات من المادة المشعة، وأن يسجل الكشاف وجود جسيمة، فإذا سجل الكشاف مثل هذا الحدث ستنكسر الزجاجة وتموت القطة، وإذا لم يحدث ستعيش القطة. وليس لدينا أي وسيلة لمعرفة ما حدث في التجربة إلى أن نفتح الصندوق وننظر داخله. ويحدث التفكك الإشعاعي بالصدفة البحتة ولا يمكن التنبؤ به إلا بالمعنى الإحصائي. وطبقًا لتفسير كوبنهاجن الصارم، وتمامًا كما في تجربة الثقبين حيث إن الفرصة متساوية للإلكترون أن يمر خلال أي من الثقبين، وينتج من هذين الاحتمالين المتداخلين حالة من التطابق، وعليه فإنه في هذه الحالة تتساوى فرصة حدوث التفكك الإشعاعي وعدم حدوث التفكك الإشعاعي، ويجب أن يؤدي ذلك إلى حالة تطابق، وتتحكم في التجربة بأكملها، القطة وخلافه، «واقعية» قاعدة التطابق إلى أن ننظر إلى التجربة، وعند هذه اللحظة فقط من المشاهدة تنهار دالة الموجة إلى إحدى الحالتين، وإلى أن ننظر إلى الداخل فهناك عينة مشعة قد تكون تفككت أو لم تتفكك وزجاجة بها سم مكسورة أو سليمة، وقطة حية وميتة، أو لا حية ولا ميتة.

وإنه لأمر عادي أن نتصور جسيمة أولية مثل الإلكترون قد لا توجد هنا أو هناك، لكن في بعض حالات التطابق يكون الأمر أكثر صعوبة كي نتخيل شيئا مألوفًا مثل قطة في هذا الوضع من الحياة المعلقة، فكر شرودنجر في هذا المثال ليثبت أن هناك عيبًا في تفسير كوبنهاجن الصارم حيث إنه

* راجع مثلًا الخطابات ١٦–١٨ في كتاب شرودنجر «خطابات حول الميكانيكا الموجية».



شكل ٩-١٩: يمكن أن يتحول نيوترون لفترة وجيزة إلى بروتون زائد بيون مشحون على أن يعود الاثنان معا بسرعة.



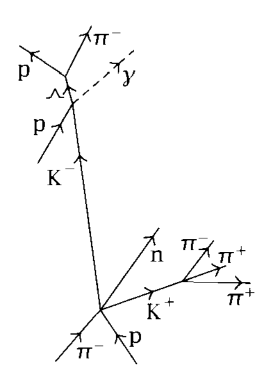
شكل ٩-٢٠: ويمكن أن يكون البيون زوجًا من نيوترون/نيوترون مضاد خياليًا لفترة وجيزة بالمثل.

من الواضح أن القطة لا يمكن أن تكون حية وميتة في آن معًا. ولكن هل هذا أكثر «وضوحًا» من «حقيقة» أن الإلكترون لا يمكن أن يكون جسيمة وموجة في الوقت نفسه؟ وقد جرى اختبار أن الحكم بالفطرة للواقع الكمي

لا يزال يتطلب المزيد. والشيء المؤكد الذي نعرفه هو أن عالم الكم لا يثق بالحكم بالفطرة ويعتقد فقط في الأشياء التي نستطيع رؤيتها أو تسجيلها بأجهزتنا دون لبس؛ فلن نعرف ماذا يدور داخل الصندوق ما لم ننظر فيه.

استمر الجدل حول القطة في الصندوق لمدة خمسين عامًا، وقد قالت إحدى المدارس الفكرية إنه ليس هناك أي مشكلة لأن القطة قادرة تمامًا على أن تقرر لنفسها ما إذا كانت حية أو ميتة، وأن وعي القطة كاف ليقدح انهيار دالة الموجة. وفي هذه الحالة، أين سنضع خط النهاية، فهل النملة أو البكتريا على علم بما جرى؟ وإذا تحركنا في اتجاه آخر، وحيث إن هذه التجربة ليست سوى تجربة ذهنية فقط، فلنا أن نتصور إنسانًا متطوعًا قد أخذ مكان القطة في الصندوق (يشار أحيانا إلى المتطوع «صديق ويجنر» على اسم يوجين ويجنر (Eugene Wigner) الذي فكر بعمق حول تحويرات في تجربة القطة في الصندوق، وبالمصادفة كان يوجين صهر ديراك) ومن الواضح أن الإنسان في الصندوق ملاحظ واع ولديه المقدرة من وجهة نظر ميكانيكا الكم أن يحدث انهيارًا لدالات الموجة. وعندما نفتح الصندوق مفترضين أننا محظوظون بما فيه الكفاية ونجد الإنسان ما زال حيًا، فإننا سنكون متأكدين تمامًا أنه لن يشير إلى أي خبرة غريبة، بل إن الأمر ببساطة هو أن مصدر الإشعاع قد فشل في إنتاج أي جسيمة في الوقت المناسب، إلا أنه ما زال بالنسبة لنا أن الشيء الوحيد الصحيح حول ما يجري داخل الصندوق هو حالات تطابق إلى أن ننظر داخله.

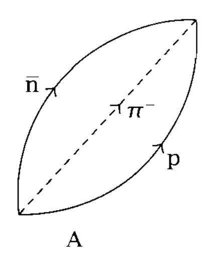
وسلسلة الأحداث بلا نهاية، تصور أننا قد أعلنا التجربة مقدمًا إلى العالم الفضولي، ولكن لنتجنب تدخل الإعلام أجرينا التجربة خلف الأبواب المغلقة، وحتى بعد فتح الصندوق وترحيبنا بصديقنا أو سحب الجثة من الصندوق إلى الخارج، لن يعرف مندوبو الإعلام في الخارج ما الذي يجري، فبالنسبة لهم يكون البناء الذي به معملنا ككل في حالة من حالات التطابق، وهكذا نعود إلى حالة تراجع لانهائي.

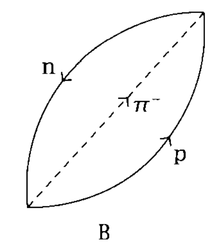


شكل ٩-٢١: شكل (زمكان) فينمان لتداخل أصيل لعدة جسيمات كُشِفَ عنها بواسطة صورة غرفة الفقاعة ووصفها فريتوف كابرا في كتابه «طاوية الفيزياء».

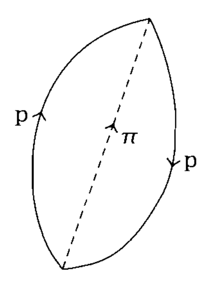
شكل ٩-٢٢: يستطيع بروتون منفرد أن يدخل ضمن شبكة من التداخلات الخيالية مثل هذه، مأخوذة من كتاب «عالم الجسيمات الأولية» لمؤلفه فورد بليسديل (Ford Blaisdell)، نيويورك ١٩٦٣، ويحدث مثل هذا التداخل طيلة الوقت، وليس هناك جسيمة منعزلة كما قد يبدو لأول وهلة.

لو افترضنا أننا وضعنا مكان صديق ويجنر حاسوبًا، يستطيع الحاسوب أن يسجل المعلومات عن التفكك الإشعاعي أو عن عدم حدوثه، فهل يستطيع





شكل ٩-٢٣: يمكن أن يظهر بروتون، ونيوترون مضاد، وبيون لا شيء على الإطلاق، كتموجات للفراغ لفترة قصيرة من الزمن قبل التلاشي (A). ويمكن تمثيل هذا التداخل نفسه كحلقة في الزمان، بواسطة بروتون ونيوترون يتعقب كل منهما الآخر حول دوامة من الزمان ترتبط بالبيون (B)، وكل من وجهتي النظر صحيحة بالقدر نفسه.



شكل ٩-٢٤: يمكن للبروتون أن يتعقب ذيله عبر الزمان بالطريقة نفسها.

الحاسوب أن يحدث انهيارًا لدالة الموجة (على الأقل داخل الصندوق)؟ ولم لا؟ إلا أنه وفقًا لوجهة نظر أخرى ما يهم ليس الإدراك البشري لما أسفرت عنه التجربة أو حتى إدراك أي مخلوق حي، لكن المهم هو حقيقة أن ما نتج من هذا الحدث على المستوى الكمي قد سُجِّلَ أو ترك تأثيرًا على العالم الماكروي، وقد تكون الذرة المشعة في حالة تطابق لكن بمجرد «نظر» عداد

جايجر لناتج التفكك، تصبح الذرة مجبرة على التواجد في حالة أو في أخرى، أي أنها تفككت أو لم تتفكك.

وهكذا يكتنف مثل تجربة القطة في الصندوق نغمة تناقض على خلاف تجربة EPR الذهنية، فمن المستحيل التوافق مع تفسير كوبنهاجن الصارم دون قبول «واقع» القطة الحية/الميتة وقد أدى ذلك بويجنر وجون ويلر إلى أن يعتبرا احتمال أن العالم ككل ربما يدين بوجوده «الواقعي» إلى حقيقة أنه قد يُشاهد بواسطة الكائنات الذكية فقط. ويرجع ذلك إلى تراجع غير محدود للسبب والأثر. وأغلب تناقضات كل الاحتمالات المتأصلة في نظرية الكم سليلة مباشرة من تجربة القطة لشرودنجر التي تقف فجأة مما يسميه ويلر تجربة الاختيار المتأخر.

الكون التشاركي

كتب ويلر عدة آلاف من الكلمات في تفسير نظرية الكم وذلك في الكثير من النشرات العلمية المختلفة على مدى أربعة عقود* وقد ظهر أوضح تفسير لمفهومه عن «الكون التشاركي» في مساهمته في مؤتمر «بعض الغرائب في التناسب» (التي حررها هارى وولف) وكان المؤتمر بمناسبة الاحتفال بمئوية ميلاد أينشتاين. استعاد ويلر في تلك المساهمة (فصل ٢٢ من المجلد) نادرة عن الزمن الذي كان يلعب فيه مع مجموعة من الناس لعبة العشرين سؤالًا القديمة في حفل عشاء، وعندما حان دوره للخروج من الحجرة حتى يتفق الضيوف على الشيء الذي يجب أن يكون موضع السؤال، وقد تُرك خارج الحجرة «لفترة غير معقولة» من الزمن وهذه إشارة مؤكدة لأحد أمرين، إما أن المشاركين كانوا يختارون كلمة فريدة في صعوبتها أو يفكرون في

---

* ولد ويلر ١٩١١ وكان في السن المناسب لاستيعاب التأثير الكلي لاكتشافات عشرينيات القرن العشرين. وكانت الأجيال التي جاءت بعد ذلك راغبة تمامًا في تقبل نظرية الكم، كتقبل لميراث الحكمة، ويستخدمون كتاب طهي الكم كقواعد أساسية للعبة، ووجدت الأجيال الأكبر سنًا راحة في وجود نظرية متماسكة، ذلك مع التأثيرات الطبيعية للتقدم في السن التي تقلل من حماس الريادة، وأصبح جيل ويلر وفيتمان حتميًا الجيل الذي قاسى من البحث الروحي بمعناها الكلي، وحدث ذلك مع أينشتاين الذي هو كالعادة استثناء.

عمل مؤذ، وقد وجد هو بدوره أن الإجابات في البداية قد جاءت من كل ضيف في دوره سريعة على أسئلته مثل «هل هذا الشيء حيوان؟» أو «هل هو أخضر؟» وكلما تقدم الوقت في اللعبة أصبحت الأسئلة تلقى وقتًا أطول في الرد، وهو أمر غريب، حيث إنه من المفترض أن كل الحاضرين قد اتفقوا على ذلك الشيء وأن الإجابة المطلوبة نعم أو لا فلماذا يستغرق الشخص الموجه له السؤال وقتًا طويلًا في التفكير قبل أن يعطى الإجابة؟ وفي النهاية، وعندما لم يتبق لويلر سوى سؤال واحد، ضمن ويلر «هل هو سحاب؟» وكانت الإجابة نعم مصحوبة بموجه عارمة من الضحك من قبل الجموع، وسُمح له بالاطلاع على السر.

كانت هناك خطة تآمرية على ألا يتفقوا على الشيء المطلوب تخمينه، لكن كان هناك اتفاق على أن كل شخص عندما يسأل فعليه أن يعطي إجابة نزيهة تتعلق بشيء حقيقي يدور في ذهنه ويتوافق مع كل الإجابات التي طرحت من قبل، وكلما استمر الحاضرون في اللعب أصبح الأمر أكثر صعوبة للسائل وللمطروح عليهم الأسئلة.

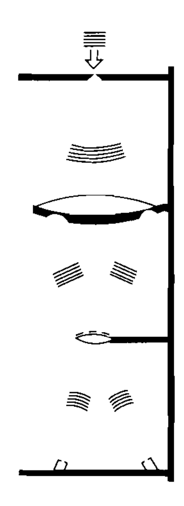
ما علاقة هذا بنظرية الكم؟ مثل مفهومنا عن العالم الواقعي الموجود هناك عندما لا ننظر إليه، تصور ويلر أن هناك إجابة واقعية للشيء الذي يحاول التعرف عليه، لكن لم تكن هناك إجابة، فكل ما هو واقعي كانت هي الإجابات على الأسئلة، نفس المسلك حيث إن الشيء الوحيد الذي نعرفه عن عالم الكم هو نتائج تجاربنا، وقد نتج جواب السحاب بشكل ما نتيجة طرح الأسئلة. وبالمنطق نفسه فإن الإلكترونات كانت نتيجة عملية التحقق التجريبي الدقيق. وتركز القصة على أن المحور الأساسي لنظرية الكم هو أنه ليس هناك ظاهرة أولية يقال عنها ظاهرة إلى إن تسجل كظاهرة، وهذه الطريقة في التسجيل من الممكن ان تلعب حيلًا غريبة في مفهومنا اليومي للواقعية.

وليوضح ويلر هذه المقولة قام بإجراء تجربة ذهنية أخرى، وهي تحوير لتجربة الشقين الطوليين، وفي هذه النسخة من اللعبة ربط الشقين الطوليين بعدسة لتركيز الضوء المار خلال المنظومة، وجرى استبدال الشاشة

القياسية الثانية بعدسة أخرى تجعل الفوتونات القادمة من كل من الشقين تتباعد، وكل فوتون يعبر خلال أحد الشقين يتجه إلى الشاشة الثانية، ثم يحيد لوجود العدسة الثانية في اتجاه الكشاف الموجود إلى اليسار، إلى جانب أن الفوتون الذي يعبر خلال الشق الآخر سيتجه إلى الكشاف الموجود ناحية اليمين، وبهذا الوضع للتجربة، فإننا نعرف أي شق مر خلاله كل فوتون. وبكل تأكيد فإن مثل تلك النسخة من التجربة التي نراقب فيها كل شق، لكي نرى كل فوتون يمر، تمامًا كما في حالة التجربة التي لو سمحنا فيها لفوتون واحد عند زمن معين أن يمر خلال الجهاز، فإننا بدون أي لبس سنحدد المسار الذي يتبعه الفوتون ولا يوجد هنا تداخل لعدم وجود أي حالة من حالات التطابق.

والآن فلنعدل في الجهاز مرة ثانية، نغطي العدسة الثانية بفيلم فوتوغرافي على شكل شرائح طولية كتلك المستخدمة في النوافذ، ويمكن إغلاق هذه الشرائح الطولية لتكوّن ستارًا محكمًا يمنع الفوتونات من العبور خلال العدسة والحيود، أو يمكن فتح هذه الشرائح لتسمح للفوتونات بالمرور كما كان في الماضى. والآن عندما كانت الشرائح الطولية مغلقة، تصل الفوتونات إلى الشاشة كما في حالة تجربة الثقبين الكلاسيكية وليس هناك وسيلة تدلنا من أي الثقبين مر الفوتون، ويوجد الآن نسق تداخل كما لو أن كل فوتون منفرد قد مر خلال الثقبين في اللحظة نفسها، وهنا تظهر الخدعة في هذه التجربة، فليس من الضروري أن نقرر ما إذا كانت الشرائح الطولية مفتوحة أو مغلقة إلا بعد مرور الفوتون خلال الثقبين. فمن الممكن أن ننتظر حتى يمر الفوتون خلال الشقين، وعندئذ نقرر هل سنجرى تجربة يمر فيها الفوتون خلال ثقب واحد أو خلال الثقبين معًا وفي تجربة الاختيار المتأخر هذه هناك شيء نفعله له تأثير لا يمكن تتبعه من حيث ما الذي نستطيع قوله عن الماضى؛ فتاريخ فوتون واحد على الأقل يعتمد على اختيارنا لكيفية إجراء القياسات.

ظن الفلاسفة مليًّا ولفترة طويلة في حقيقة أن التاريخ لا معنى له، والماضي لا وجود له، إلا في الطريقة التي يُسَجَّل بها في الوقت الحاضر،

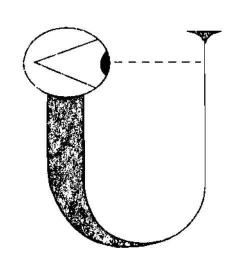


شكل ٩-٢٥: تجربة ويلر للشق الطولي المزدوج، والاختيار المتأخر.

وتستخلص تجربة ويلر للاختيار المتأخر هذا المفهوم الموجز إلى مصطلحات صلبة وعملية «ليس لنا بعد ذلك الحق في القول عماذا يفعله الفوتون» — إلى أن يُسجل — أكثرمن القول (ما الكلمة التي في الحجرة؟) حتى تنتهي لعبة السؤال والرد عليه». (بعض الغرائب صفحة ٣٥٨).

إلى أي مدى يمكن الدفع بهذا المفهوم؟ سيخبرك طهاة الكم السعداء، وهم يجهزون أجهزة الحاسوب، ويتعاملون مع المادة الوراثية، أن كل ذلك ما هو إلا تخمينات فلسفية ليس لها أي معنى في حياتنا اليومية في العالم الماكروي. ولكن كل شيء في العالم الماكروي يتكون من جسيمات تخضع لقواعد الكم، فكل ما نطلق عليه واقعًا يتكون من أشياء لا نستطيع اعتبارها واقعًا؛ «أي خيار لدينا عدا أن نقول بطريقة ما، ربما سنكتشفها فيما بعد، إن كل الأشياء لا بد أن تبنى على إحصائيات للبلايين فوق البلايين لمثل أفعال المراقبة المشاركة؟»

واصل ويلر غير خائف إطلاقًا ليصل إلى الفقرة الملهمة الهائلة (تذكر رؤيته حول الإلكترون المنفرد الذي ينسج طريقه عبر الزمان والمكان)، وذهب



شكل ٩-٢٦: يمكن تصور العالم ككل مثل تجربة الاختيار المتأخر التي يوجد فيها المشاهدون الذين يلاحظون ماذا يحدث، هي التي تُضفي الواقع المتشابك على أصل كل شيء.

إلى اعتبار أن الكون ككل دائرة مثارة ذاتيًّا وتشاركيًّا. وبدءًا من الانفجار الكبير حيث يتمدد الكون ويبرد، ثم بعد آلاف الملايين من السنوات ينتج كائنات قادرة على مراقبة الكون و«فعل المشاهدة التشاركية — عن طريق آلية تجربة الاختيار المتأخر — ويعطي هذا بدوره واقعًا متشابكًا للكون، ليس الآن فقط ولكن منذ بدايته.» وبملاحظة فوتونات الخلفية الإشعاعية الكونية، صدى الانفجار الكبير، ربما نخلق الانفجار الكبير والكون. فإذا كان ويلر على صواب، فإن فينمان كان أكثر قربًا مما كان يتصور من الحقيقة عندما قال إن تجربة الثقبين «تحتوي على الغموض الوحيد».

لقد همنا في عالم الميتافيزيقيا متتبعين ويلر، وإنني لأتخيل أن كثيرًا من القراء يعتقدون أن كل ما تم يعتمد على تجارب افتراضية ذهنية، وبذا فأنت تستطيع أن تلعب أي لعبة تشاء وإنه فعلًا لا يهم أن تلتزم بأي تفسيرات للواقع، وما نحتاجه هو بعض الأدلة القاطعة من تجارب حقيقية نبني عليها حكمنا حول أفضل اختيار للتفسير من بين كل الاختيارات الميتافيزيقية المتاحة، وكانت تجربة أسبكت (Aspect) في بداية ثمانينيات القرن العشرين هي البرهان القاطع الذي أمدنا به؛ برهان على أن غرابة الكم ليست فقط «واقعًا» بل يمكن مشاهدتها وقياسها.

الفصل العاشر

برهان البودنج

يأتي البرهان التجريبي المباشر للواقع المتناقض لعالم الكم من النسخ الحديثة لتجربة EPR الذهنية، ولا تتضمن التجارب الحديثة قياسات موقع حركة الجسيمات وكميتها، بل الحركة المغزلية (سبين) والاستقطاب، وخاصية الاستقطاب للضوء مشابهة بشكل ما للحركة المغزلية في الجسيمة المادية. وقد قدم دافيد بوم (David Bohm) من كلية بيركبك (Birkbeck) بلندن فكرة قياس الحركة المغزلية (سبين) في نسخة جديدة لتجربة EPR الذهنية سنة ١٩٥٢، ولكنها لم تؤخذ بعين الجد من أي طرف حتى الستينيات من القرن العشرين، فلم يجر أحد تجارب لاختبار تنبؤات نظرية الكم فعليًا في مثل هذه الظروف. وقد ظهر تقدم الفهم المفاجئ في بحث نشر سنة ١٩٦٤ لجون بل (John Bell) عالم الفيزياء الذي يعمل في مركز الأبحاث الأوروبي CERN القريب من جنيف،* ولكن حتى نفهم هذه التجارب نحتاج الرجوع إلى الوراء قليلًا قبل هذا البحث المحوري ونتأكد أن لدينا فكرة واضحة عما يعنى «سبين» (الحركة المغزلية) و«الاستقطاب».

تناقض سبين (الحركة المغزلية)

لحسن الحظ فإن كثيرًا من غرائب سبين (الحركة المغزلية) لجسيمة مثل الإلكترون، يمكن إهمالها في هذه التجارب، وليس من المهم إذا «دارت»

* ج. س. بيل، الفيزياء Physics، المجلد ١، صفحة ١٩٥ سنة ١٩٦٤.

الجسيمة مرتين قبل أن تظهر بالوجه نفسه مرة ثانية، وما يهم هنا هو أن الحركة المغزلية تحدد الاتجاه في الفراغ، إلى «أعلى» وإلى «أسفل» الأمر الذي يماثل الطريقة التي تدور بها الأرض التي تحدد اتجاه محور شمال-جنوب، وبالمقارنة بمجال مغناطيسي منتظم فإن الإلكترون يستطيع أن يستقيم في حالتين محتملتين فقط: في اتجاه المجال أو في الاتجاه العكسي، «فوق» أو «تحت» وفقًا لاتفاق اختياري. تبدأ تعديلات بوم على دوافع EPR بزوج من البروتونات مرتبط الواحد بالآخر في ترتيب يطلق عليه الحالة الانفرادية Singlet. ويكون العزم الزاوي الكلي دائمًا لمثل هذا الزوج من البروتونات مساويًا للصفر، وعندئذ نستطيع أن نتصور أن الجزيء قد انشطر إلى الجسيمتين المكونتين له أصلًا، وتفرقًا في اتجاهات معاكسة، ويمكن أن يكون لكل من هذين البروتونين عزم زاوي وحركة مغزلية (سبين) ولكن لا بد أن تكون الحركة المغزلية لكل منهما متساوية ولها قيمة عكسية لنتأكد أن المجموع لزوج البروتونات مازال صفرًا كما كان الأمر عندما كانا معًا.*

وهذا تنبؤ بسيط حيث تتفق نظرية الكم والميكانيكا الكلاسيكية معًا، فإذا عرفت قيمة سبين (الحركة المغزلية) لإحدى جسيمات الزوج فإنك ستعرف قيمة الآخر، حيث إن المجموع صفر، ولكن كيف يمكن أن تقيس الحركة المغزلية لجسيمة واحدة؟ القياس سهل في العالم الكلاسيكي؛ لأننا نتعامل مع الجسيمات في عالم ثلاثي الأبعاد، وبذا علينا أن نقيس الاتجاهات الثلاثة للحركة المغزلية، وبجمع مكونات الأبعاد الثلاثة سنحصل على الحركة المغزلية الكلية (باستخدام قواعد حساب المتجهات التي لن أخوض فيها هنا). ولكن الوضع في عالم الكم مختلف جدًا؛ أولًا: عند قياس أحد مكونات الحركة المغزلية فإنك تغير من المكونات الأخرى، ومتجهات الحركة المغزلية خصائص تكميلية ولا يمكن قياسها في الوقت نفسه بأي صورة أكثر من قياس الموقع وكمية الحركة في الوقت نفسه أيضا. وثانيًا: الحركة المغزلية

---

* أتبع في هذا المثال الشرح التفصيلي الواضح جدًا لتجربة بل بواسطة بيرنارد ديسباجنات Bernard d'Espagnat في مقال «نظرية الكم والواقع» المنشور في نسخة من ساينتفيك أمريكان العدد ٣٠٦٦. إلا أن شرحي مع ذلك، أبسط كثيرًا لكن مقال ديسباجنات يحتوي على تفاصيل أكثر كثيرًا.

لجسيمة مثل الإلكترون أو البروتون هي نفسها مكنتمة (quantized)، فإذا قيست الحركة المغزلية في أي اتجاه فإنك ستحصل على إجابة واحدة أعلى أو أسفل، وفي بعض الأحيان تكتب +١ أو −١، وبقياس الحركة المغزلية في أحد الاتجاهات وليكن مثلًا محور z، قد نحصل على إجابة +١ (وهناك احتمال ٥٠٪ تمامًا أن تكون نتيجة التجربة كذلك). والآن قس الحركة المغزلية في اتجاه آخر وليكن المحور-y. وأي إجابة ستتصل إليها، ارجع لقياس الحركة المغزلية للاتجاه الأول مرة أخرى، القيمة التي «تعرفها» الآن. كرر التجربة مرارًا وافحص النتائج التي توصلت إليها، والنتيجة أن قياسنا للحركة المغزلية للجسيمة في الاتجاه z، ومعرفتنا أنه يتجه إلى «أعلى» قبل قياس الحركة في الاتجاه y، فعند الاتجاه لقياس الحركة في الاتجاه z مرة أخرى، فلن تغير معرفتنا الأولى بشيء، والجواب سيكون إلى «أعلى» نصف الوقت فقط، وقياس متجه الحركة المغزلية التكميلية قد حافظ على حالة عدم التيقن الكمي التي قيست مسبقًا.*

وعليه فماذا يحدث إذا حاولنا قياس الحركة المغزلية لإحدى الجسيمتين المنفصلتين؟ فإذا أخذنا في الاعتبار أن الجسيمتين منفصلتان فقد نتخيل أن كل جسيمة تمر بتموجات عشوائية في مكونات حركتها المغزلية، التي تشوش أي محاولة لقياس الحركة المغزلية الكلية لأي من الجسيمتين، ولكن إذا أخذناهما معًا، فلا بد أن تكون الحركة المغزلية لكل منهما متساوية، وعكس بعضهما، وعليه فإن التموجات العشوائية للحركة المغزلية لأيهما لا بد أن تتوازن وتتساوى وتصبح عكس التموجات «العشوائية» في مكونات الحركة المغزلية للجسيمة الأخرى البعيدة جدًّا. وكما هو مذكور في دفوع EPR الأصلية فإن الجسيمات ترتبط بعضها ببعض بواسطة الفعل عن بعد، وقد اعتبر أينشتاين هذه «اللامحلية الشبحية» هراء، مما يعني وجود شرح

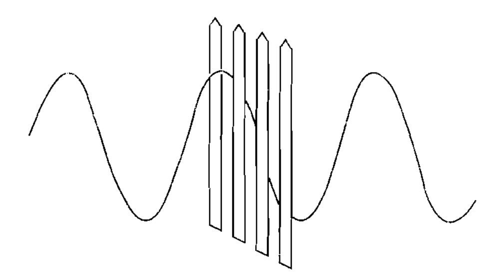
* ربما نعتقد أن عدم التقين يجب أن يكون $\hbar$؟ وهو كذلك. الوحدة الأساسية للحركة المغزلية هي $(1/2)\hbar$ كما أرسى ذلك ديراك، وهذا ما نعنيه باختزال «وحدة +١ سبين». والفرق بين وحدة +١ ووحدة −١ هو الفرق بين زائد وناقص $(1/2)\hbar$ الذي هو طبعًا مجرد $\hbar$، ولكن ما يهم في التجارب التي نناقشها هنا هو اتجاه الحركة المغزلية (سبين) فقط.

في نظرية الكم، وقد استعرض جون بل كيف أن التجارب يمكن إعدادها لقياس هذه اللامحلية الشبحية وإثبات أن نظرية الكم صحيحة.

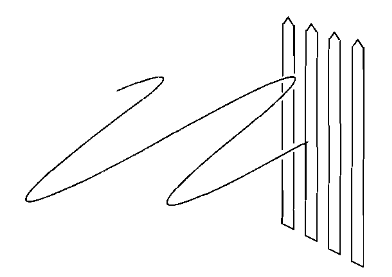
لغز الاستقطاب

وقد تضمنت معظم التجارب التي أجريت حتى هذه اللحظة لعمل هذا الاختبار استقطاب الفوتونات بدلًا من الحركة المغزلية (سبين) للجسيمات المادية، لكن المبدأ هو نفسه. فالاستقطاب خاصية تحدد الاتجاه في الفراغ المرتبط بفوتون أو بشعاع من الفوتونات تمامًا كما أن الحركة المغزلية تحدد الاتجاه في الفراغ المرتبط بالجسيمات المادية؛ فنظارة الشمس البولارويد تعمل بأنها تحجب الفوتونات التي ليس لها استقطاب معين جاعلة المنظر أمام مرتدي النظارة أكثر إظلامًا. تصور أن نظارة الشمس مصنوعة من مجموعة من الشرائح مثل الستائر المعدنية، وأن الفوتونات تحمل رماحًا طويلة، وأن كل الفوتونات التي تمسك بالرماح مائلة بعض الشيء عبر صدورها تستطيع أن تمرق خلال الشرائح وتشاهدها بعينيك، وكل الفوتونات التي تحمل الرماح متجهة إلى أعلى لن تستطيع العبور خلال الشقوق الضيقة وستُحجب.

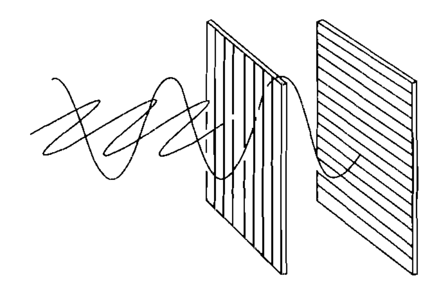
ويحتوي الضوء العادي على كل أنواع الاستقطاب؛ الفوتونات برماحها الممسوكة بزوايا مختلفة. وهناك أيضا نوع من الاستقطاب يسمى الاستقطاب الدائري، حيث يتغير اتجاه الاستقطاب أثناء تقدم الفوتون، وكما أنني أحاول مزج تماثلاتي، فلنتصور الفتاة التي تسير في مقدمة العرض وهي تحرك عصاها في حركة دائرية، ويأتي هذا بطريقتين مختلفتين، واحدة تجاه اليمين والأخرى تجاه اليسار. ويمكن استخدام ذلك أيضا في اختبارات دقة النظرية الكمية للعالم، فالضوء المستقطب في أحد المستويات الذي به كل الفوتونات تحمل رماحها بالزاوية نفسها يمكن أن ينتج عن طريق الانعكاس في ظل الظروف الصحيحة، أو بإمرار الضوء خلال مادة مثل عدسة بولارويد التي تسمح فقط بمرور استقطاب معين، ويُظْهر الضوء المستقطب في أحد المستويات مرة أخرى قواعد عدم التيقن الكمي أثناء عملها.



شكل ١٠-١: موجات مستقطبة رأسيًّا تمرق عبر «ألواح السور».



شكل ١٠-٢: حجب موجات مستقطبة أفقيًّا.



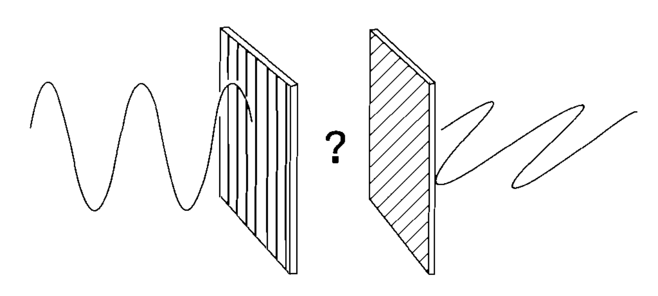
شكل ١٠-٣: الاستقطابات المتقاطعة توقف كل الموجات.

إن استقطاب الفوتون في اتجاه أو آخر هي خاصية «نعم/لا» مثل الحركة المغزلية للجسيمة على المستوى الكمي، إما أنها تستقطب في اتجاه معين — ربما رأسيًّا — أو لا. فالفوتونات التي تمر خلال ستارة معدنية ستحجب حتمًا بستارة أخرى موضوعة بزاوية قائمة، فإذا كان المستقطب

الأول مثل ستارة معدنية بشرائح أفقية، فالستارة الثانية ستكون مثل ألواح سور مرصوصة رأسيًّا، والشيء المؤكد بما فيه الكفاية أنه عندما يكون هناك قطعتان من المادة المستقطبة «تعامدتان» بهذا الشكل فلن يمر أي ضوء. لكن لو افترضنا أن لوح البولارويد الثاني تصنع «شرائحه» بزاوية ٤٥° مع شرائح المستقطب الأول؟ فالفوتونات التي تصل إلى المستقطب الثاني تمثل كلها ٤٥° مع المستوى، وبناء على الصورة الكلاسيكية فالفوتونات لا تمر. أما الصورة الكمية فهي مختلفة، ومن هذا المنطلق يملك كل فوتون فرصة ٥٠٪ للعبور خلال المستقطب غير المتوازي مع الأول، وبالفعل تمر نصف الفوتونات. والآن يأتي الأمر الغريب حقًّا؛ فالفوتونات التي استطاعت العبور صارت بالفعل ملتوية، وقد جرى استقطابها بزاوية ٤٥° بالنسبة للمستقطب الأصلي، وعليه فماذا يحدث إذا قابلت الآن هذه الفوتونات مستقطبًا آخر يضع زاوية قائمة مع المستقطب الأول، وحيث إن الزاوية القائمة ٩٠°، فإنها لا بد وأن تكون بزاوية ٤٥° مع هذا المستقطب أيضا، وتمر نصف الفوتونات كما حدث في الماضي.

وعندما يوجد استقطابان متعامدان فلن يمر أي ضوء، لكن إذا وضعت مستقطبًا ثالثًا بين الاثنين المتعامدين بحيث يصنع زاوية ٤٥° مع كل منهما، فإن ربع الضوء الذي يمر خلال المستقطب الأول يمر كذلك خلال الاثنين الآخرين، ويبدو الأمر وكأننا وضعنا سياجين يمنعان دخول الحيوانات الضالة بنسبة ١٠٠٪ إلى ممتلكاتنا، ولنكون أكثر حرصًا قررنا بناء سياج ثالث بينهما لنطمئن أكثر، ولكن لدهشتنا وجدنا أن بعض الحيوانات الضالة التي منعها السياج المزدوج لم تجد أي صعوبة في العبور خلال السياجات الثلاثة كما لو كان لا يوجد أي سياج. وبتغيير التجربة فإننا نغير من طبيعة الواقع الكمي، وعندما نستخدم مستقطبات بزوايا مختلفة فإننا فعليًّا نقيس استقطاب المكونات المختلفة لمتجه، وكل قياس جديد يبطل شرعية المعلومات التي حصلنا عليها من كل القياسات السابقة.

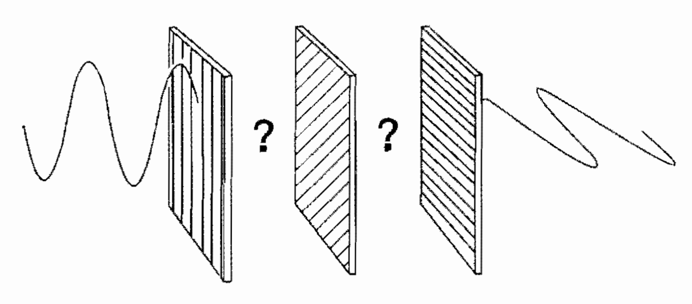
ويُدخل هذا تنويعة جديدة على موضوع EPR، فنحن نتعامل مع فوتونات بدلًا من جسيمات مادية، ولكن التجربة الأساسية مازالت كما هي،



شكل ١٠-٤: مستقطبان يصنعان زاوية ٤٥° يمرران نصف الموجات التي مرت من الأول.

ولنتخيل الآن عملية ذرية تنتج فوتونين يتحركان في اتجاهين مختلفين، وهناك عمليات واقعية تحدث بهذا الشكل، وفي مثل هذه العمليات هناك دائمًا علاقة بين استقطاب الفوتونين، فلا بد أنهما إما أن يستقطبا في نفس الاتجاه أو بشكل ما في اتجاه معاكس، وللتبسيط سنتصور في تجربتنا الذهنية أن الاستقطابين لا بد أن يكونا هما نفسهما. وبعد فترة طويلة من ترك الفوتونين مكان ميلادهما تقرر قياس استقطاب أي منهما، فلنا حرية الاختيار، وهذا شيء اختياري كلية، في أي اتجاه سترص مواد الاستقطاب؟ وبمجرد أن نفعل ذلك هناك فرصة معينة في أن يمر الفوتون خلالها. وسنعرف فيما بعد إذا كان استقطاب الفوتون إلى «أعلى» أو إلى «أسفل» لهذا الاتجاه المختار في الفراغ، ونعلم أنه — عبر الفضاء الشاسع — يستقطب الفوتون الآخر بنفس الطريقة، ولكن كيف يعرف الفوتون الآخر؟ وكيف له أن يكيف من نفسه لكي يمر بالاختبار بنفس طريقة الفوتون الأول أو يفشل في المرور كما يفشل الفوتون الأول؟ وبقياسنا لاستقطاب الفوتون الأول فإننا نحدث انهيارًا لدالة الموجة ليس فقط لفوتون واحد بل لآخر بعيد تمامًا عند اللحظة نفسها.

ومع الأمور الغريبة في هذه التجربة، فإنها ليست أكثر غرابة من اللغز الذي رسمه أينشتاين ورفاقه للاستحواذ على انتباه العلماء في ثلاثينيات القرن العشرين، إن تجربة حقيقية واحدة تستحق أكثر من نصف قرن من



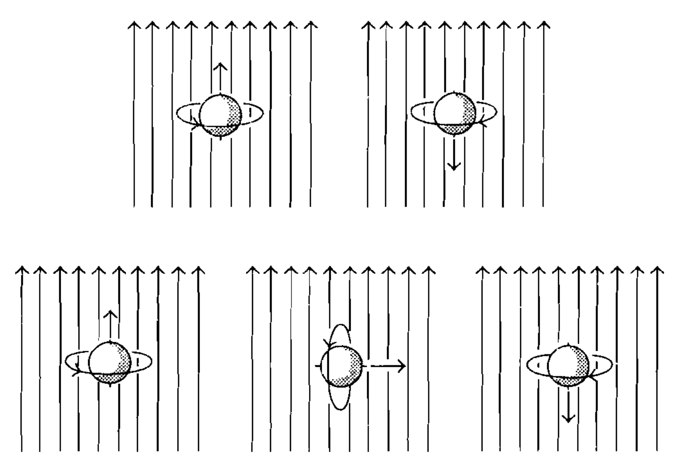
شكل ١٠-٥: ثلاثة مثل هذه المستقطبات تمرر ربع الموجات التي تعبر من الأول — حتى مع عدم مرور أي منها إذا أزلنا المستقطب الأوسط.

النقاش حول معنى تجربة ذهنية، وقد أعطى بل التجريبيين وسيلة لقياس تأثيرات هذا الفعل الشبحي عن بعد.

اختبار بل

كرس برنارد ديسباجنات، العالم النظري مثل ديفيد بوم من جامعة باريس ساويس الكثير من الفكر في تضمينات عائلة تجارب EPR. وفي مقاله المنشور في مجلة ساينتفيك أمريكان المذكورة سابقًا، وفي مساهمته في مجلد «إدراك الفيزيائيين الحسي للطبيعة» الذي حرره ميهرا، حيث وضع النقاط على الحروف للأساس الذي بنى عليه بل حل اللغز. يقول ديسباجنات إن رؤيتنا اليومية للواقع ترتكز على ثلاثة افتراضات أساسية؛ الأول: أن هناك أشياء واقعية موجودة سواء شاهدناها أم لا، والثاني: إنه أمر شرعي أن نصل إلى نتيجة من مشاهدات قوية أو تجارب، والثالث: لا يمكن أن ينتشر أي تأثير أسرع من سرعة الضوء، الذي أطلق عليه بنفسه «المحلية». وكل هذه الافتراضات الثلاثة هي أساس رؤيتنا «الواقعية المحلية» للعالم.

يبدأ اختبار بل من رؤية محلية واقعية للعالم، وبمدلول تجربة الحركة المغزلية للبروتون، ومع أن من يجري التجربة لن يعرف أبدًا المكونات الثلاثة للحركة المغزلية للجسيمة نفسها، فإنه يستطيع أن يقيس ما يفضله منها.



شكل ١٠-٦: تستطيع الجسيمات التي لها حركة مغزلية نصف أعداد صحيحة أن تصطف إما موازية للمجال المغناطيسي أو في الاتجاه العكسى، أما الجسيمات ذات الحركة المغزلية أعداد صحيحة فقادرة أيضا على أن تصطف عمودية على المجال.

وإذا أطلقنا على المحاور الثلاثة X, Y, Z، فقد وجد أنه في كل مرة يسجل فيها +١ للحركة المغزلية X لبروتون، فإنه يجد قيمة -١ للحركة المغزلية X لرفيقه، وهكذا. ولكن إذا سمح له بقياس حركة مغزلية X لبروتون وحركة مغزلية Y (أو Z ولكن ليس الاثنين معا) لرفيقه، وبهذه الطريقة لا بد أن يكون من الممكن الحصول على معلومات عن الحركة المغزلية للاتجاهين Y, X معًا لكل زوج.

وحتى من ناحية المبدأ، فهذا أمر ليس سهلًا بالمرة، ويتضمن قياسًا عشوائيًا للحركة المغزلية لكثير من أزواج البروتونات، واستبعاد تلك التي يتصادف قياس حركتها نفسها في كل فرد من الزوج، وهذا يمكن عمله، وتعطي هذه المعلومات الفاحص، من حيث المبدأ، مجموعة من النتائج التي قد يجري التعرف بها على الحركة المغزلية لأزواج من البروتونات في مجاميع يمكن أن تكتب XY, XZ, YZ، وما أراد بل أن يبنيه في مقاله الكلاسيكي سنة ١٩٦٤ أنه إذا أجريت تجربة مثل هذه فإنه وفقًا للرؤى الواقعية

المحلية للعالم، فإن عدد الأزواج التي لها حركة مغزلية موجبة ولها مكونات (X^+Y^+) لا بد وأن تكون دائمًا أقل من المجموع الكلي للأزواج التي تظهر فيها قياسات XZ, YZ كلها قيما موجبة للحركة المغزلية ($X^+Z^+ + Y^+Z^+$). وتتوالى الحسابات مباشرة من الحقيقة الواضحة أنه إذا أظهرت قياسات بروتون معين أن له حركة مغزلية X^+ وY^- مثلًا، فإن حركته المغزلية الكلية لا بد وأن تكون إما $X^+Y^-Z^+$ أو $X^+Y^-Z^-$. وتأتي باقي النتائج من دفوع رياضية بسيطة مبنية على نظرية المجاميع. ولكن في ميكانيكا الكم تختلف القواعد الرياضية، وإذا تم التعامل بها بشكل صحيح فإنها تأتي بتنبؤ عكسي وهو أن عدد أزواج X^+Y^+ «أكثر» وليس أقل من عدد أزواج Y^+Z^+، X^+Z^+ مجتمعة.

ولأن الحسابات عُبِّر عنها في الأصل بادئين بالرؤية المحلية الواقعية للعالم، فالمصطلح المتفق عليه هو أن عدم المساواة «الأول» يطلق عليه «عدم مساواة بل»، وإذا انتهكت عدم مساواة بل هذه فإن الرؤية الواقعية المحلية للعالم خادعة، وهكذا نجحت نظرية الكم مرة أخرى عند التعرض لاختبار آخر.

البرهان

من المفترض أنه من الممكن استخدام هذا الاختبار لقياس الحركة المغزلية للجسيمات بكفاءة متساوية، وهي عادة صعبة جدًّا في إجرائها أو أن تستخدم لقياس استقطاب الفوتونات التي هي أسهل في إجرائها مع أنها مازالت صعبة. ولأن كتلة سكون الفوتونات هي صفر، وتتحرك بسرعة الضوء ولا سبيل لها لتمييز الزمن، فإن بعض الفيزيائيين لا يرتاحون لإجراء تجارب تتضمن الفوتونات، وليس واضحًا في الواقع ما هو مفهوم المحلية للفوتون. ومع أن معظم اختبارات عدم مساواة بل، التي أجريت حتى الآن تتضمن قياسات استقطاب الفوتونات، فإنه من المهم للغاية أن الاختبار الوحيد الذي أُجري حتى تلك اللحظة قد استخدم فيه بالفعل قياسات الحركة المغزلية لبروتون، وهو يعطي نتائج تنتهك عدم مساواة بل، ولذا فهي تدعم الرؤية الكمية للعالم.

لم يكن هذا أول اختبار لعدم مساواة بل، بل قدم فريق من مركز ساكلي للبحوث النووية بفرنسا تقريرًا سنة ١٩٧٦ حول ذلك، وتتبع التجربة بشكل كبير التجربة الذهنية الأصلية، وتتضمن قذف بروتونات ذات طاقة منخفضة على هدف يحتوي عددًا كبيرًا من ذرات الهيدروجين، وعندما تصدم الأنوية نواة ذرة هيدروجين — الذي هو بروتون آخر — تتداخل الجسيمتان من خلال الحالة الانفرادية ويمكن قياس مكونات حركتيهما المغزلية. ولكن صعوبة القيام بتلك القياسات هائلة، ويسجل الكشاف معظم الفوتونات فقط، وخلافًا للعالم المثالى في التجربة الذهنية، وحتى عندما تجري القياسات فليس من الممكن أن نسجل مكونات الحركة المغزلية دون لبس، إلا أن نتائج التجربة الفرنسية تبين أن الرؤى الواقعية المحلية للعالم خاطئة.

وقد أجريت الاختبارات الأولى لعدم مساواة بل بجامعة كاليفورنيا بيركلي باستخدام الفوتونات، وقدم تقريرًا عن ذلك سنة ١٩٧٢، ومع بداية سنة ١٩٧٥ أُجريت ستة من مثل هذا النوع من الاختبارات كانت نتائج أربعة منها تنتهك عدم مساواة بل، ومهما كانت الشكوك حول معنى المحلية للفوتونات، فإن هذا برهان آخر صارخ لصلحة ميكانيكا الكم، وخاصة أن النتائج استخدمت تقنيات مختلفة في الأساس. وفي النسخة المبكرة للتجربة الخاصة بالفوتونات، كانت هذه الفوتونات تأتي من ذرات الكالسيوم أو الزئبق، التي يمكن إثارتها بواسطة ضوء الليزر إلى الحالة المختارة من الطاقة.* وطريق العودة من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية يتضمن إلكترونًا

* وحتى هنا فإننا نحصل على أثر لأنواع المشاكل التي حيرت بور لمدة طويلة، والأشياء الواقعية الوحيدة هي نتائج تجاربنا، والطريقة التي نجعل بها قياساتنا تؤثر على ما نقيسه، وهنا وفي ثمانينيات القرن العشرين يستخدم الفيزيائيون أداة يومية في أعمالهم هي شعاع ليزر، وظيفته ببساطة إثارة الذرات إلى الحالة المثارة. ونحن نستخدم هذه الوسيلة لأننا ملمون بالحالة المثارة وتحت أيدينا كتاب طهي الكم، لكن الغرض الكلي لتجربتنا هو أن نتحقق من دقة ميكانيكا الكم، النظرية التي اعتدنا كتابتها «كتاب طهى الكم!» وإنني لا أقول ن التجارب إذن خاطئة، فمن الممكن تصور طرق أخرى لإثارة الذرات قبل أن نجري القياسات، وتعطي الصور الأخرى للتجربة النتائج نفسها. ولكن تمامًا كما كان مفهوم الأجيال السابقة للفيزيائيين متأثرًا باستخداماتهم — على سبيل المثال الميزان الزنبركي والقواعد المترية — فإن الجيل الحاضر يتأثر بدرجة أكبر مما يتصورون في بعض الأحيان، بأدوات الكم المتاحة. ربما يهتم الفلاسفة بالسؤال عما تعنيه نتائج تجربة بل في الواقع إذا استخدمنا عمليات كمية لتجهيز التجربة، وإنني لسعيد بأن إنجاز بور هو: ما نراه هو ما نحصل عليه، ولا شيء آخر واقعي.

على مرحلتين: أولًا الانتقال إلى حالة أخرى أقل إثارة ثم الانتقال إلى الحالة الأرضية، وفي كل مرحلة ينتج فوتون واحد. وفي المراحل التي جرى اختبارها في هذه التجارب، فإن الفوتونين الناتجين يكونان مصحوبين باستقطابات مترابطة، وعندئذ تُحلل الفوتونات القادمة على شكل شلال باستخدام عداد الفوتونات الموضوع خلف مرشحات الاستقطاب.

قام التجريبيون في منتصف سبعينيات القرن العشرين بأول قياسات مستخدمين تنويعة أخرى على هذا الموضوع. كانت الفوتونات الناتجة في هذه التجارب هي أشعة جاما نتيجة تلاشي بوزيترون وإلكترون، ومرة ثانية لا بد لاستقطاب الفوتونين أن يكونا مرتبطين، ولموازنة البرهان نجد أنه إذا حاولت قياس تلك الاستقطابات فإن النتيجة التي تصل إليها هي تناقض عدم مساواة بل.

وعليه فإن خمسة من الاختبارات السبعة الأولى لعدم مساواة بل كانت في مصلحة ميكانيكا الكم، وقد ركز ديسباجانات في مقاله بمجلة ساينتفيك أمريكان على أن هذا دليل أقوى في مصلحة نظرية الكم وليس كما يبدو لأول وهلة، ولطبيعة هذه الاختبارات والصعوبات المصاحبة لإجرائها «فوجود هفوات كثيرة منتظمة في تصميم أي تجربة يمكن أن يدمر البرهان على الارتباط الواقعي ... ومن جهة أخرى، فإنه من الصعوبة أن تتخيل أن خطأ تجريبيًّا يمكن أن يسبب ترابطًا خادعًا في خمسة اختبارات أجريت منفصلة، والأكثر من ذلك فإن نتائج هذه الاختبارات لم تنتهك عدم مساواة بل فقط، بل أيضا تناقضها بالضبط كما تنبأت ميكانيكا الكم.»

ومنذ منتصف سبعينيات القرن العشرين، أُجري المزيد من الاختبارات، التي صممت لإزالة أي ثغرات باقية في تصميم الاختبارات، وقد تطلب الأمر أن توضع أجزاء الاختبار متباعدة بعضها عن بعض بما فيه الكفاية حتى إن أي إشارة «بين الكشافات»، التي قد تعطي ترابطًا زائفًا، سيكون عليها أن تنتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء، وجرى عمل ذلك ومازال يُنتهك عدم المساواة. أو ربما يحدث الترابط لأن الفوتونات تعرف «حتى أثناء تولدها» أي نوع من الأجهزة قد أُعِدّ لاصطيادها، ويمكن أن يحدث ذلك

دون الحاجة إلى إشارات أسرع من الضوء إذا أعددت التجهيزات مقدمًا ووجدت دالة موجة عامة تؤثر على الفوتون عند مولده، وعليه فإن الاختبار النهائي، حتى تلك اللحظة، لعدم مساواة بل يتضمن تغيير بنية التجربة في حين تكون الفوتونات في مسارها بنفس الطريقة التي أجريت بها تجربة الشق الطولي المزدوج حيث يمكن تغييرها ويكون الفوتون في مساره في تجربة جون ويلر الذهنية، هذه هي التجربة التي أغلق فيها فريق آلان أسبكت من جامعة باريس ساويس آخر أعظم الثقوب في النظريات الواقعية المحلية سنة ١٩٨٢.

أجرى أسبكت ورفاقه اختبارات عدم المساواة بالفعل مستخدمين فوتونات ناتجة من عملية فيض، وقد وجدوا أن هناك انتهاكًا لعدم المساواة، ويتضمن تحسينهم للتجربة استخدام مفتاح يغير من اتجاه شعاع الضوء المار، ويمكن تغيير اتجاه الشعاع في اتجاه أي من مرشحي الاستقطاب، ويقيس كل منهما اتجاهًا مختلفا من الاستقطاب، ويوجد خلف كل منهما كشاف للفوتونات خاص به ويمكن تغيير اتجاه شعاع الضوء المار عن طريق المفتاح بسرعة فائقة غير عادية، كل ١٠ نانو ثانية (عشرة أجزاء من ألف مليون جزء من الثانية ١٠ × ١٠^{-٩} s) بواسطة تصميم آلي يولد إشارة شبه عشوائية، وحيث إن الفوتون يستغرق زمنًا قدره ٢٠ نانو ثانية لينتقل من الذرة التي تولد منها إلى قلب التجربة ليصل إلى الكشاف نفسه، ولا توجد أي طريقة يمكن بواسطتها للمعلومات عن ترتيب التجربة أن تنتقل من جزء من التجهيزات إلى جزء آخر وتؤثر على أي من القياسات، إلا إذا كان هذا المؤثر ينتقل أسرع من الضوء.

ماذا يعني ذلك؟

التجربة تامة تقريبًا، حتى لو لم يكن فتح وغلق شعاع الضوء عشوائيًا تمامًا، إلا أنها تتغير لكل من شعاعي الفوتونات بطريقة منفصلة، والخطأ الحقيقي الوحيد المتبقي هو أن معظم الفوتونات الناتجة لا تُرصد، لأن الكشافات نفسها متدنية الكفاءة جدًا، ومازال من المحتمل أن نجادل بأن

الفوتونات التي تنتهك عدم مساواة بل تُرصد، وأن الباقي قد يخضع لعدم المساواة فقط إذا أمكن رصدها، ولكن حتى تلك اللحظة لم يفكر أحد في تصميم تجربة لاختبار هذه الإمكانية غير المحتملة، وأنه ليبدو أن هذا الجدل يمثل قمة اليأس، وفور إعلان نتائج فريق أسبكت قبل أعياد الميلاد سنة ١٩١٢* مباشرة لم يشك أحد بشكل جاد في أن اختبار بل يؤكد تنبؤات نظرية الكم. وفي الواقع نتائج هذه التجربة الأفضل، التي يمكن تحقيقها بتقنية هذه الأيام، تناقض عدم المساواة بدرجة أكبر من أي اختبارات سابقة وتتفق بشكل جيد جدًا مع تنبؤات ميكانيكا الكم. وكما قال ديسباجنات: «إن التجارب التي أجريت حديثًا كان من الممكن أن ترغم أينشتاين على تغيير مفهومه عن الطبيعة في نقطة كان يعتبرها حيوية ... ويمكن أن نقول بأمان تام إن عدم الانفصال هو الآن واحد من أكثر المفاهيم المعينة العامة في الفيزياء.»†

ولا يعنى هذا أن هناك أي بارقة أمل في إمكانية القدرة على إرسال رسالة بسرعة تفوق سرعة الضوء، وليس هناك أي أمل معقود لنقل المعلومات المفيدة بهذه الطريقة، لأنه ليس هناك وسيلة لربط حدث معين، يسبب حدثًا آخر، بالحدث الآخر الذي تسببت فيه هذه العملية، إنها سمة أساسية للتأثير الذي ينطبق فقط على الأحداث التي لها سبب مشترك؛ تلاشي زوج بوزيترون/إلكترون، وعودة إلكترون إلى الحالة الأرضية، وانفصال زوج من البروتونات من الحالة الانفرادية. ويمكنك أن تتخيل كشافين وضعا بعيدًا عن بعضهما في الفراغ، وكذلك فوتونات من مصدر مركزي تتطاير في اتجاه كل من الكشافين، وربما تتخيل تقنية بسيطة معينة تغير استقطاب أحد شعاعس الفوتونات، حتى يلاحظ مراقب بعيد عن الكشاف الثاني تغييرًا في استقطاب الشعاع الآخر، ولكن أي نوع من الإشارة ذلك الذي يتغير؟ إن التغير الأصلي في الاستقطاب أو الحركة المغزلية للجسيمات في الشعاع

* Physical Review Letters، المجلة ٤٩ صفحة ١٨٠٤.

† إدراك الفيزيائيين الحسي للطبيعي، المحرر ج ميهرًا صفحة ٧٣٤.

هي نتيجة العمليات العشوائية التي لا تحمل أي معلومات بذاتها، وكل ما سيراه المشاهد هو نسق عشوائي مختلف عن النسق العشوائي الذي قد يراه بدون المعالجة البارعة للمستقطب الأول! وحيث إنه لا توجد معلومات في النسق العشوائي، فذلك يكون بلا جدوى، والمعلومات موجودة في الفرق بين النسقين العشوائيين غير أن النسق الأول لا يوجد أبدًا في العالم الواقعي، ولا توجد أي وسيلة لاستخلاص المعلومات.

لكن لا تكن محبطًا بصورة كبيرة، حيث إن تجربة أسبكت والتجارب السابقة عليها تضع بالتأكيد صورة مختلفة للعالم عما نعرفه في حياتنا اليومية بالفطرة، وتخبرنا أن الجسيمات التي كانت في وقت ما مرتبطة ببعضها في تداخل تظل بطريقة ما أجزاء من نظام واحد، تتجاوب معًا في تداخلات أخرى، وفي النهاية فإن كل شيء نراه ونلمسه ونشعر به يتكون من تجمعات لجسيمات هي بدورها كانت متداخلة مع جسيمات أخرى عبر الزمن في الماضي، وحتى لحظة الانفجار الكبير الذي جاء منه الكون الذي نعرفه. إن الذرات في جسدي تتكون من جسيمات كانت في زمن ما تندفع في تقارب شديد في كرة النار الكونية مع جسيمات أخرى هي الآن جزء من نجم بعيد أو مع جسيمات قد تكون جزءًا من مخلوق حي آخر موجود على مسافة بعيدة فوق كوكب لم يكتشف بعد، ومن المؤكد أن الجسيمات التي يتكون منها جسدي كانت في وقت ما تندفع متقاربة وتتداخل مع الجسيمات التي تكون الآن جسدك، ونحن جميعًا جزء من نظام واحد تمامًا مثل الفوتونين المتطايرين من قلب تجربة أسبكت.

ويجادل نظريون مثل ديسباجنات وديفيد بوم أن علينا أن نتقبل ذلك، حرفيًا، فكل شيء مرتبط بكل شيء آخر، وأن التعامل الشامل للكون (الهوليستي) هو وحده الذي ربما قد يفسر ظواهر مثل الوعي البشري.

ومازال الوقت مبكرًا جدًا على الفيزيائيين والفلاسفة الذين يميلون نحو مثل هذه الصورة الجديدة للوعي والكون، أن يأتوا بمخطط لشكله المحتمل، والمناقشة التخمينية للعديد من الإمكانيات التي تشدقنا بها قد لا يكون لها محل هنا، ولكنني أستطيع أن أقدم مثالًا من خلفيتي يأتي أساسًا من

التقاليد الصارمة للفيزياء والفلك: فأحد الألغاز العظيمة في الفيزياء هي خاصية القصور الذاتي ومقاومة الجسم للتغير في الحركة لا للحركة ذاتها، وأي جسم يتحرك في فراغ يحافظ على حركته في خط مستقيم عند سرعة ثابتة إلى أن تدفعه قوة خارجية، وهذا هو أحد اكتشافات نيوتن العظيمة؛ إن كمية الدفع المطلوبة لتحريك الجسم تعتمد على كمية المواد التي يحتويها، ولكن كيف للجسم أن «يعرف» أنه يتحرك بسرعة ثابتة في خطوط مستقيمة، وبالنسبة لأي سرعة تقاس سرعته؟ وقد أصبح الفلاسفة على دراية تامة منذ عهد نيوتن بأن المعيار الذي يرجع إليه عند قياس القصور الذاتي يبدو أنه الإطار المرجعي الذي كان يطلق عليه عادة «النجوم الثابتة»، إلا أننا قد نتكلم الآن من منطلق المجرات البعيدة. والحركة المغزلية للأرض في الفراغ أو بندول فوكولت مثل تلك التي نراها في العديد من المتاحف العلمية أو رائد فضاء أو الذرة، كل هؤلاء «يعرفون» ما هو متوسط توزيع المادة في الكون.

ولا يعرف أحد لماذا أو كيف تعمل المؤثرات، وقد أدى ذلك إلى تخمينات خادعة إن لم تكن مفيدة، فإذا كان هناك جسيمة واحدة في كون فارغ فلن يكون لها قصور ذاتي لأنه لا يوجد أي شيء يمكن قياس حركتها أو مقاومتها للحركة بالنسبة له، ولكن إذا تواجدت جسيمتان في كون فارغ فهل سيكون لهما نفس القصور الذاتي كما لو كانا في كوننا؟ ولو استطعنا بطريقة سحرية أن نزيل نصف المادة من كوننا، فهل سيكون للنصف الباقي القصور الذاتي نفسه أم نصفه؟ (أو ضعفه؟) ومازال هذا اللغز عظيمًا حتى اليوم كما كان منذ ثلاثمائة سنة مضت ولكن فناء الرؤى الواقعية المحلية للعالم يعطينا مفتاحًا لهذا اللغز؛ فإذا حافظ كل شيء تداخل في أي وقت في الانفجار الكبير على ارتباطه مع كل شيء تداخل معه، فعندئذ «ستعرف» كل جسيمة في كل نجم ومجرة نستطيع أن نراها بوجود كل جسيمة أخرى، ويصبح القصور الذاتي لغزًا ليس لعلماء الكون وعلماء النسبية ليتجادلوا فيه بل أمرًا أساسيًّا في عرين ميكانيكا الكم.

هل يبدو ذلك تناقضًا؟ لقد لخص ريتشارد فينمان الوضع بإحكام في محاضرته «التناقض، ما هو إلا اختلاف بين الواقعية وشعورك بما يجب أن

تكون عليه الواقعية» وهل يبدو ذلك سفسطة مثل الجدل حول عدد الزوايا التي يمكن أن ترقص على رأس دبوس؟ وبالفعل، مسبقًا سنة ١٩٨٣، وبعد بضعة أسابيع من نشر نتائج فريق أسبكت أعلن علماء من جامعة سوسكس بإنجلترا نتائج تلك التجارب، التي لم تقدم تأكيدًا مستقلًّا لارتباط الأشياء على المستوى الكمي فقط، بل قدمت مدخلًا للاستخدامات العملية متضمنة أجيال عديدة من الحواسيب، متقدمة على تقنية الحالة الجامدة كما فعل راديو الترانزستور نفسه كحد متطور على راية السيمافور كجهاز للإشارة.

التأكد والتطبيقات

تعامل فريق سوسكس وعلى رأسه تيري كلارك Terry Clark مع معضلة قياس واقعية الكم بطريقة عكسية؛ فبدلًا من محاولة بناء تجارب تعمل على المقياس العادي للجسيمات الكمية — على مستوى الذرات أو أقل — حاولوا بناء «جسيمات كمية» تقارب كثيرًا حجم أجهزة القياس المتفق عليها، وتعتمد تقنيتهم على خاصية التوصيل الفائق مستخدمين حلقة من مادة فائقة التوصيل، لها مقطع حوالي نصف سنتيمتر، وبها انقباض عند نقطة معينة، حيث تضيق الحلقة إلى عشرة أجزاء من المليون من السنتيمتر المربع في مساحة مقطعها. وهذه «الوصلة الضعيفة» التي ابتكرها بريان جوزيفسون Brian Josephson الذي طور وصلة جوزيفسون، تجعل حلقة المادة فائقة التوصيل تعمل كأسطوانة مفتوحة الجانبين مثل أنبوب الأرغن أو صفيحة من الزنك نزعت نهايتاها. وتصف موجات شرودنجر مسلك الإلكترونات فائقة التوصيل وكأنها تعمل مثل موجات الصوت المثبتة في أنبوب الأرغن التي يمكن «ضبط نغماتها» باستخدام مجال كهرومغناطيسي متغير عند ترددات الراديو، وفي الواقع فإن موجة الإلكترون حول الحلقة ككل تضاعف جسيمة كمية مفردة، وباستخدام كشاف حساس لترددات الراديو، يستطيع الفريق أن يشاهد تأثيرات التحول الكمي لموجة الإلكترون في الحلقة، وعمليًا فإن الأمر يبدو وكأن لديهم جسيمة كمية مفردة قطرها

نصف سنتيمتر يعملون بها — مثل الدلو الصغير المملوء بالهليوم فائق الميوعة الذي سبق ذكره — بل أكثر دراماتيكية منه.

وتقدم التجربة قياسات مباشرة لتحولات كمية مفردة، وتعطي أيضًا برهانًا جليًّا آخر لعدم المحلية، ولأن الإلكترونات في حالة التوصيل الفائق تعمل كبوزون واحد فإن موجة شرودنجر التي تُجري التحول الكمي تنتشر حول كل الحلقة، ويسبب كل هذا البوزون الكاذب التحول في الوقت نفسه، ولا يُشاهد جانب واحد من الحلقة وهو يقوم بالتحول أولًا، والجانب الآخر يلحق به فقط عندما تصبح لدى الإشارة، التي تتحرك بسرعة الضوء، الوقت الكافي لتنتقل حول الحلقة وتؤثر على باقي «الجسيمة»، وبطريقة ما فإن هذه التجربة أقوى من اختبار أسبكت لعدم مساواة بل، ويعتمد هذا الاختبار على مجادلات — مع أنها رياضيًّا ليست مبهمة — فليس من السهل تتبعها للشخص العادي غير المتخصص، ومن الأسهل كثيرًا استيعاب مفهوم «الجسيمة» المفردة ذات القطر نصف سنتيمتر وما زالت تسلك مثل جسيمة كمية مفردة، ويتجاوب هذا كليًّا ولحظيًّا لأي حث تستقبله من الخارج.

وقد قام بالفعل كلارك ورفاقه بالتطوير المنطقي التالي حيث كانوا يأملون في تصميم «ذرة ماكروية» أكبر، ربما على شكل أسطوانة مستقيمة طولها ٦ أمتار، فإذا استجاب هذا التصميم للإثارة الخارجية كما هو متوقع فلا بد من وجود شرخ مفتوح في الباب الذي يقود إلى اتصال أسرع من الضوء، وسيستجيب لحظيًّا الكشاف المثبت على أحد نهايتي الأسطوانة لغرض قياس الحالة الكمية، للتغير في الحالة الكمية الناتجة عن الإشارة التي حدثت عند الطرف الآخر للأسطوانة، ومازال هذا الأمر عديم الجدوى بالنسبة للإشارات المألوفة؛ فلن نستطيع بناء ذرة ماكروية تصل من هنا إلى القمر مثلًا، وأن نستخدمها للتخلص من التباطؤ المقلق عند الاتصال بين مكتشفي القمر والتحكم الأرضي هنا، لكن قد يكون لها استخدام عملي مباشر.

وأحد أهم العوامل المؤثرة في معظم الحواسيب الحديثة المتقدمة هي السرعة التي يمكن بها للإلكترون أن يتحرك حول مجموعة الدوائر من

مكون لآخر والتأخر في الزمن المعني ويكون صغيرًا في مدى النانو ثانية، لكن ذو دلالة هامة، فالتواصل اللحظي المتوقع عبر المسافات الكبيرة ليس سهلًا بالمرة عن طريق تجارب جامعة سوسكس، لكن إمكانية بناء حواسيب إلكترونية بها كل المكونات التي تتجاوب لحظيًّا مع أي تغير في حالة إذا أصبح أحد المكونات في عالم الممكن، وقد شجع هذا الأمر تيري كلارك ليدعى أنه «عندما تترجم قواعده إلى دوائر في العتاد (hardware) فإن ذلك سيجعل إلكترونيات القرن العشرين المذهلة تبدو كأنها سيمافورات عتيقة مقارنة بها.»*

لم ترسخ التجارب تفسير كوبنهاجن كلية فقط بل يبدو أن هناك تطورات أخرى مازالت في الجعبة أبعد مما قدمته ميكانيكا الكم لنا بالنسبة للتطورات الأبعد من الابتكارات الكلاسيكية، ولكن مازال تفسير كوبنهاجن غير كاف فكريًّا، فماذا يحدث لكل هذه العوالم الكمية الشبحية التي تنهار مع دوالها الموجبة عندما تقوم بقياس نظام تحت ذري؟ وكيف لواقع متداخل لا أقل ولا أكثر من الواقع الذي نقيسه نحن في النهاية، ويختفي ببساطة عندما تتم عملية القياس؟ وأفضل إجابة هي أن الواقعيات البديلة لا تختفي، وأن قطة شرودنجر في الواقع حية وميتة في الوقت نفسه، ولكن في عالمين أو أكثر مختلفين. إن تفسير كوبنهاجن وتضميناته العملية موجودة كلية في رؤية الواقعية الأكثر اكتمالًا، تفسير العوالم المتعددة.

* في صحيفة الجارديان يوم ٦ يناير سنة ١٩٨٢، وبينما كنت أجهز هذا الفصل للمطبعة ظهرت تطورات مشابهة على نفس المنوال في معامل بل، حيث يستخدم الباحثون تقنية وصلة جوزيفسون لتطوير «مفاتيح» جديدة وسريعة لمجموعة دوائر الحواسيب. وقد استخدمت هذه المفاتيح فقط في وصلة جوزيفسون «المتعارف عليها» وتعمل بسرعة تفوق مجموعة الدوائر العيارية للحواسيب عشر مرات، ومن المحتمل أن تحتل هذه التطورات عناوين الصحف ويكون لها استخدامات عملية في المستقبل القريب، ولكن لا تنزعج — فالتطورات التي يتكلم عنها كلارك بعيدة المنال وقد لا يمكن استخدامها قبل نهاية هذا القرن، ولكنها قفزة هائلة إلى الأمام.



الفصل الحادي عشر

العوالم المتعددة

لم أحاول أن أنحاز لجانب معين حتى الآن، بل حاولت تقديم قصة الكم بكل جوانبها وأن أدع القصة تتكلم عن نفسها، وقد حان الوقت الآن كي أقف لأبدي رأيي، وسأتخلى في هذا الفصل الأخير عن أي مظهر لعدم الانحياز وأعرض تفسير ميكانيكا الكم الذي أجد أنه مقنع جدًّا أو مريح. وليست هذه رؤية الأغلبية، فمعظم الفيزيائيين الذين يشغلون أنفسهم بالتفكير في مثل هذه الأمور سعداء بتفسير كوبنهاجن عن انهيار الدوال الموجية، إلا أن الأقلية لها رؤية جديرة بالاحترام، وتتميز بأنها تحتوي بداخلها تفسير كوبنهاجن، والسمة غير المريحة التي منعت هذا التفسير المحسن من اكتساح عالم الفيزيائيين هو أنها تعني وجود العديد من العوالم — يحتمل وجود عدد لانهائي — بجانب واقعنا عبر الزمن، موازية لعالمنا، لكنها محجوبة عنه للأبد.

من يراقب المراقبين؟

نشأت فكرة تفسير العوالم المتعددة في أبحاث هيو إيفرت (Hugh Everett) طالب الدراسات العليا بجامعة برنستون في خمسينيات القرن العشرين؛ كان متحيرًا حول الطريقة الغريبة التي تنهار بها دوال الموجة في تفسير كوبنهاجن بطريقة سحرية عند المشاهدة، وقد ناقش البدائل مع العديد من الأشخاص ومن بينهم جون ويلر الذي شجع إيفرت ليطور مسلكه البديل كرسالة للدكتوراه. وتبدأ هذه الرؤية البديلة بسؤال بسيط جدًّا هو أن الذروة

المنطقية للتعبير عن الانهيارات المتتابعة لدالة الموجة تعني أنه عندما أُجري التجربة في حجرة مغلقة ثم أخرج وأخبرك بالنتائج، التي ترسلها أنت إلى صديق، الذي بدوره يبلغها لشخص آخر، وهكذا، وفي كل خطوة تصبح دالة الموجة أكثر تعقيدًا وتحتضن أكثر من «العالم الواقعي»، ولكن تبقى البدائل عند كل مرحلة متساوية، وتتداخل الواقعيات حتى تصل أخبار النتائج النهائية للتجربة. ولنا أن نتخيل أن الأخبار ستنتشر عبر كل العالم بهذه الوسيلة حتى يصل العالم ككل إلى حالة من دوال الموجة المتداخلة، وستشاهد الواقعيات البديلة التي تنهار في عالم واحد عند المشاهدة، ولكن من يشاهد الكون؟

وحسب التعريف، فإن الكون مغلق على نفسه، وهو يحتوي على كل شيء ولذلك لا يوجد مراقب خارجي يراقب وجود الكون، ومن ثم تنهار شبكيته المعقدة من تداخلات الواقعيات البديلة إلى دالة موجة مفردة، وفكرة ويلر عن الوعي — أنفسنا — كمراقب هام يعمل خلال سببية عكسية إلى الوراء حتى الانفجار الكبير هي وسيلة للخروج من هذه المعضلة، ولكنها تتضمن جدلًا حلقيًّا محيرًا مثل الجرة التي يحاول إزالتها. وإنني أفضل فكرة الأنانة، أي أنه يوجد مراقب واحد للكون هو أنا، وأن مشاهداتي هي كل العوامل الهامة التي تبلور الواقعية من شبكة احتمالات الكم، لكن الأنانة المفرطة فلسفة غير مقنعة تمامًا لشخص كل مساهمته للعالم أن يكتب كتبًا ليقرأها أناس آخرون، وتفسير إيفرت عن العوامل المتعددة هو أمر آخر أكثر إقناعًا واحتمال أكثر اكتمالًا.

وينحصر تفسير إيفرت في أن دوال الموجة المتداخلة لكل الكون، الواقعيات البديلة التي تتداخل لتنتج تداخلًا يمكن قياسه عند المستوى الكمي، لا تنهار، وكل الدوال متساوية في واقعيتها، وتوجد في أجزائها الخاصة بها من «الفضاء الفائق» (والزمان الفائق). والذي يحدث عند إجراء قياسات عند المستوى الكمي هو أننا مضطرون عن طريق المشاهدة أن نختار أحد هذه البدائل، الذي يصبح جزءًا مما نراه في عالمنا «الواقعي»، وتقطع المشاهدة الروابط التي تربط الواقعيات البديلة بعضها ببعض،

وتسمح لها بأن يذهب كل منها في طريق منفصل عبر الفضاء الفائق، وتحتوي كل واقعية بديلة على مُشاهِدها الخاص بها الذي حصل على المشاهدة نفسها لكنه توصل إلى «إجابة» كمية مختلفة ويتصور أنه «تسبب في انهيار دالة الموجة» إلى بديل كمي وحيد.

قطة شرودنجر

من الصعب أن نستوعب ماذا نعني عندما نتكلم عن انهيار دالة الموجة لكل الكون، لكن الأمر قد يصبح أسهل كثيرًا عندما نرى مدخل إيفرت كخطوة للأمام عند النظر إلى مثال أبسط. إن بحثنا عن القطة الحقيقة المختبئة داخل صندوق شرودنجر المتناقض، يأتي أخيرًا إلى نهاية، حيث يعطي هذا الصندوق الذي أحتاجه لأستعرض قوة تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم، والمفاجأة أن هذا المسلك سيؤدى في النهاية ليس إلى قطة واحدة بل اثنتين.

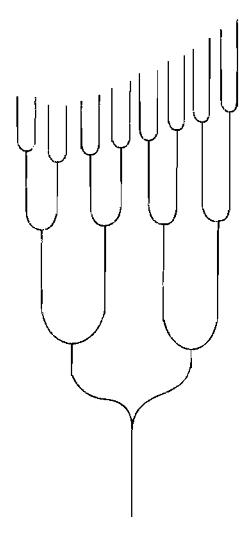
تدلنا معادلة ميكانيكا الكم أن داخل صندوق تجربة شرودنجر الذهنية الشهيرة صورتين لدالة موجة «قطة حية» و«قطة ميتة» والاثنتان حقيقيتان على قدم المساواة، وينظر تفسير كوبنهاجن المتفق عليه إلى هذه الاحتمالات من منظور مختلف، ويقول إن الدالتين في الواقع غير حقيقة بنفس المقدار وإن إحداهما فقط ستتبلور كواقع عندما ننظر داخل الصندوق، ويتقبل تفسير إيفريت معادلات الكم كلية بكامل وجاهتها، ويقول إن كلًّا من القطتين حقيقة واقعة؛ فهناك قطة حية وقطة ميتة، ولكنهما يوجدان في عالمين مختلفين. وليس الأمر أن الذرة المشعة داخل الصندوق تتفكك أم لا تتفكك، بل يحدث كل من الحالتين، ونواجه بالقرار بأن العالم ككل — الكون — ينقسم على نفسه في صورتين متطابقتين من جميع الأوجه، عدا أنه في إحدى الصورتين تتفكك الذرة وتموت القطة، وفي الصورة الأخرى لا تتفكك الذرة وتبقى القطة حية، ويبدو هذا كخيال علمي، لكنه يذهب أعمق من أي خيال علمي، ومبني على معادلات رياضية لا تقبل الشك ومتماسكة ولها تتابع منطقي في أن نأخذ ميكانيكا الكم حرفيًّا.

ما بعد الخيال العلمي

إن أهمية أعمال إيفرت التي نشرت سنة ١٩٥٧، والتي نتناول فيها الفكرة التي تبدو خيالية في مظهرها، إلا أنه وضعها على أسس رياضية لا تقبل الشك، مستخدمًا قواعد نظرية الكم؛ فأن نخمن شيئًا عن طبيعة الكون هذا أمر، لكن أن نطور من هذه التخمينات ونضعها في نظرية للواقعية كاملة ومتسقة مع نفسها فهذا أمر آخر. ولم يكن إيفرت في الواقع هو أول شخص يخمن بهذا الشكل، مع ما قد يبدو أنه توصل لأفكاره مستقلًّا تمامًا عن أي اقتراحات عن الواقعيات المضاعفة والعوالم المتوازية، ومعظم التخمينات — التي زادت زيادة كبيرة في الواقع منذ سنة ١٩٥٧ — قد ظهرت على صفحات الخيال العلمي. وقد استطعت أن أقتفي أثر أول نسخة من ذلك نشرت لأول مرة في مسلسل في مجلة سنة ١٩٣٨ بواسطة جاك ويليمسون في «فرقة الزمان» The Legion of Time.*

ومعظم قصص الخيال العلمي موضوعة في إطار الواقعيات «المتوازية» مثل انتصار الجنوب في الحرب الأهلية الأمريكية، ونجاح الأرمادا الأسبانية في هزيمة إنجلترا، وهكذا، وبعض هذه القصص يصف مغامرات بطل ما يسافر على جانب الزمان، من واقع بديل إلى واقع آخر، وقليل من هذه القصص تصف، بلغة عبثية، كيف ينفصل عالم بديل عن عالمنا. وتتناول قصة ويليمسون الأصلية عالمين تبادليين لا يصل أيهما إلى واقعية راسخة إلا عند وقوع حدث معين من زمن حرج في الماضي، حيث يفترق طريق العالمين (وهناك أيضا سفر «توافقي» عبر الزمان في هذه القصة، كما أن الحدث حلقي مثل الجدل). وتردد الفكرة انهيار دالة الموجة كما وُصِفت في تفسير كوبنهاجن المتعارف عليه، وتتضح ألفة ويليمسون مع الأفكار الجديدة في ثلاثينيات القرن العشرين من المقطع الذي يشرح فيه أحد الأشخاص ماذا يحدث:

* «التواء الزمان» كتاب مبكر لي، وكله حول العوالم المتوازية، لكنه يحتوي على الحد الأدنى الضروري من مناقشة نظرية الكم.

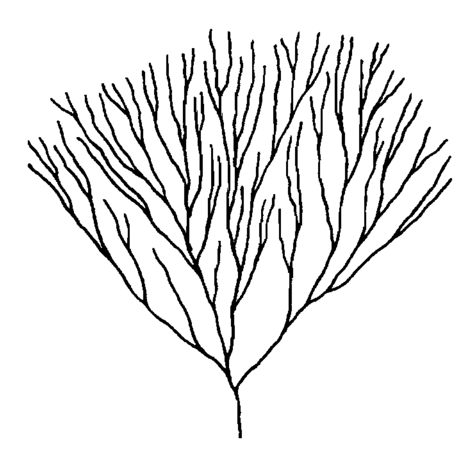


شكل ١١-١: تقترح عبارة «الدوال المتوازية» أن الواقعيات التبادلية تصطف.

بإحلال موجات الاحتمالية بدلًا من الجسيمات المتماسكة أصبحت خطوط العالم للأشياء غير ثابتة، ولم تعد ممراته البسيطة موجودة، ويمتلك الجيوديستيون* توالد عدد لانهائي من الفروع المحتملة حسب اللاتحديدية تحت الذرية.

وعالم ويليمسون هو عالم للواقعيات الشبحية حيث يجري الحدث البطولي بينما تنهار أحد هذه العوالم، ويختفي لدى اتخاذ القرار الحاكم، ويُخْتار شبح آخر ليصبح واقعًا متماسكًا. وعالم إيفرت واحد من الواقعيات المتماسكة العديدة، الذي تتساوى فيه كل العوالم بنفس الدرجة، حيث أيضًا، واحسرتاه، حتى الأبطال لا يستطيعون الانتقال من واقع إلى أحد جيرانه، لكن نسخة إيفرت عن العالم واقع علمي وليست خيالًا علميًّا.

* الجيوديسيا فرع من الرياضيات التطبيقية يهتم بدراسة شكل الأرض وقياس سطحها (المترجمان).



شكل ١١-٢: صورة أفضل ترى الكون ينشطر دائمًا مثل شجرة لها فروع.

دعونا نعد مرة ثانية للتجربة الأساسية في فيزياء الكم، تجربة الثقبين، وحتى في إطار تفسير كوبنهاجن المتفق عليه، ومع أن قليلين من طهاة الكم على علم بذلك، فنسق التداخل الذي يظهر على شاشة تلك التجربة عندما تمر جسيمة واحدة فقط عبر الجهاز قد شُرِحَ على أن الأمر تداخل بين واقعين تبادليين تمر في أحدهما الجسيمة خلال الثقب (A) وفي الآخر تمر خلال لثقب (B)، وعندما ننظر إلى الثقبين نرى جسيمة واحدة تمر خلال أحدهما وليس هناك تداخل. ولكن كيف للجسيمة أن تختار من أي الثقبين تمر؟ بالنسبة لتفسير كوبنهاجن فإن الاختيار عشوائي، وهو ما يتفق مع احتمالات الكم، ويلعب الرب النرد مع الكون. وبتفسير العوالم المتعددة فإن الجسيمة لا تختار، وبالمواجهة فالاختيار على المستوى الكمي ليس للجسيمة نفسها فقط، بل ينشطر كل الكون إلى نسختين، تمر في أحد الكونين خلال الثقب (A) وتمر في الآخر خلال الثقب (B)، وفي كل كون هناك المُشاهد الذي يرى الجسيمة تمر خلال ثقب واحد فقط، ويصبح العالمان بعد ذلك وللأبد منفصلين تماما ولا يتداخلان، وهذا هو السبب في عدم وجود تداخل على شاشة التجربة.

اضرب هذه الصورة في عدد الأحداث الكمية التي تحدث طوال الوقت في كل منطقة من الكون، وسيعطيك هذا فكرة عن عدم تقبل الفيزيائيين التقليديين لهذه الفكرة، ولكن — وكما فعل إيفرت منذ خمسة وعشرين عامًا مضت — أمر منطقي، وصف متماسك بذاته للواقعية الكمية لا يتعارض مع أي دليل من التجربة أو المشاهدة.

لم يحدث تفسير إيفرت الجديد لميكانيكا الكم — بالرغم من رياضياته التي لا تقبل الشك — أي اضطرابات على سطح بركة المعرفة العلمية عندما نُشر سنة ١٩٥٧، وقد ظهرت نسخة من أبحاثه في «مرجع الفيزياء الحديثة»* وبجانبه نشر بحث آخر لويلر يلفت الانتباه إلى أهمية أعمال إيفرت†، إلا أن تلك الأفكار ظلت مهملة إهمالًا كبيرًا حتى التقطها برايس دي ويت (Bryce DeWitt) من جامعة نورث كارولينا بعد أكثر من عشر سنوات.

وليس هناك سبب واضح لماذا استغرقت الفكرة كل هذا الوقت ليتم الاقتناع بها، ولو حتى من القلة، ثم لاقت نجاحًا في سبعينيات القرن العشرين. وبعيدًا عن الرياضيات المعقدة، شرح إيفرت بعناية في مجلة مرجع الفيزياء الحديثة أن الجدل حول انشطار الكون إلى عوالم عديدة لا يمكن أن يكون واقعيًّا، لأنه لا خبرة لنا بذلك، وأن الأمر كالإناء المثقوب لا يحتفظ بالماء داخله، وتخضع كل العناصر المنفصلة كحالات التطابق لمعادلة الموجة بعدم اكتراث تام لحقيقة وجود العناصر الأخرى، والغياب الكلي لتأثير أي فرع على الآخر، الأمر الذي يعني أن المُشاهِد لا يمكن أن يكون أبدًا على علم بعملية الانشطار. وجدل بهذا الشكل يماثل الجدل بأن الأرض لا يمكن أن تدور في مدار حول الشمس لأنه إذا حدث ذلك فيجب أن نشعر به. ويقول إيفرت: «في كلتا الحالتين، إن النظرية نفسها تتنبأ بأن خبرتنا ستكون في الحقيقة على ما هي عليه.»

* المجلد ٢٩، صفحة ٤٥٤.

† المجلد ٢٩، صفحة ٤٦٣.

ماذا بعد أينشتاين

في حالة تفسير العوالم المتعددة نرى أن النظرية بسيطة في الفهم، وسببية وتعطي تنبؤات تتماشى مع الخبرة، وقد حاول ويلر جاهدًا أن يجعل الناس يلاحظون هذه الفكرة:

> من الصعب أن نبين بجلاء كيف أسقطت «حالة النسبية» المفاهيم الكلاسيكية تمامًا، والتعاسة الأولية لمثل هذه الخطوة يمكن أن تنطبق على بعض الأمثلة في التاريخ: عندما وصف نيوتن الجاذبية بشيء مناف للطبيعة مثل الفعل عن بعد، أو كما وصف ماكسويل أي شيء طبيعي مثل الفعل عن بعد معبرًا عنه بتعبير غير طبيعي مثل نظرية المجال، وحتى عندما أنكر أينشتاين الخاصية المفضلة لأي نظام متناسق ... ولكن مقارنة أي شيء مستخلص من بقية الفيزياء، ماعدا مبدأ النسبية العامة الذي ينص على أن كل أنظمة المحاور العادية لها نفس الوضع.*

وقد ختم ويلر مقاله بأن قال «بعيدًا عن مفهوم إيفرت، ليس هناك نظام لأفكار متناسق مع نفسه متاح ليشرح ماذا نعني بأن نكنتم نظامًا مغلقًا مثل الكون مع النسبية العامة». كلمات قوية بالفعل، لكن تفسير إيفرت يعاني عيبًا رئيسيًّا محاولًا إخراج تفسير كوبنهاجن من مكانته التي رسخت في الفيزياء؛ فصورة العوالم المتعددة في ميكانيكا الكم تأتي بالتنبؤات نفسها التي حصلنا عليها من رؤية كوبنهاجن عند تقييم الناتج المحتمل لأي تجربة أو مشاهدة، ويحتوي هذا الأمر على نقطة قوة ونقطة ضعف أيضًا. وحيث إن تفسير كوبنهاجن لم يُتَطلَّب أبدًا في الأمور العملية فإن أي تفسير جديد لا بد وأن يعطي «الإجابات» نفسها مثل تفسير كوبنهاجن أينما أمكن اختباره، وعليه فإن تفسير إيفرت قد فاز في الاختبار الأول، إلا أنه يتقدم على رؤية كوبنهاجن فقط عندما تزال سمات التناقض

* Op. cit.، صفحة ٤٦٤.

الظاهرية من تجربة الشق الطولي المزدوج، أو في اختبارات من النوع الذي ابتكره أينشتاين وبودولسكى وروزين. ومن وجهة نظر كل طهاة الكم فإنه من الصعوبة أن نرى الفرق بين التفسيرين، ومن الطبيعي الميل للارتباط بالمألوف، وعلى كل، بالنسبة لأي إنسان درس التجارب الذهنية EPR، ودرس الآن الاختبارات المختلفة لعدم مساواة بل، فإن الانحياز نحو تفسير إيفرت يصبح أكبر كثيرًا، وفي تفسير إيفرت، ليس باختيارنا لأي من مكونات الحركة المغزلية نقيس قوى مكون الحركة المغزلية لجسيمة أخرى، بعيدة عبر الكون، لنأخذ بطريقة سحرية حالة تكميلية، لكن بالأحرى باختيارنا لمكون الحركة المغزلية لنقيس فإننا نختار أي فروع الواقعية نعيش نحن فيه. وفي هذا الفرع من الفضاء الفائق تكون الحركة المغزلية للجسيمة الأخرى تكميلية دائمًا للجسيمة التي نقيسها؛ إنه الاختيار هو الذي يقرر في أي العوالم الكونية نقيس تجاربنا، ومن ثم في أي عالم نقطن دون فرصة أخرى، وحيث إن كل الاحتمالات الناتجة من التجربة تحدث فعلًا، فكل ناتج محتمل يُشاهده مجموعة من المراقبين خاصة به، فليس من المدهش أن ما نشاهده هو أحد النتائج المحتلمة للتجربة.

نظرة ثابتة

ظل تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم مهملًا عن عمد في مجتمع الفيزياء إلى أن أخذ دي ويت الفكرة في أواخر ستينيات القرن العشرين، وكتب عن المفهوم بنفسه، كما شجع أحد طلابه، نيل جراهام (Neill Graham) في أن يجعل رسالته للدكتوراه عن تطوير وامتداد أعمال أيفرت، وكما شرح دى ويت في مقال سنة ١٩٧٠* في مجلة الفيزياء اليوم، أن تفسير إيفرت له بريق لحظي عند استخدامه في تناقض قطة شرودنجر، ولا داعي الآن للقلق حول اللغز المتعلق بما إذا كانت القطة حية وميتة معًا، أو ليست حية وليست ميتة، وبدلًا من ذلك فإننا نعلم في عالمنا أن الصندوق يحتوي على

* المجلد ٢٣ من العدد ٩ (سبتمبر ١٩٧٠) صفحة ٣٠.

قطة إما حية أو ميتة، وهناك في العالم المجاور يوجد مشاهد آخر وعنده صندوق مطابق تمامًا لصندوقنا يحتوي على قطة إما ميتة أو حية، وإذا كان الكون في حالة «انشطار دائم إلى عدد مذهل من الأفرع» حينئذ «كل تحول كمي يحدث في كل نجم، وفي كل مجرة، وفي كل ركن بعيد من الكون يحدث انشطارًا في عالمنا المحلي على الأرض إلى عدد هائل من النسخ لنفسه».

استعاد دي ويت الصدمة التي مر بها عند مواجهة هذا المفهوم وأن «فكرة انشطار ١٠^١٠٠ نسخة ليست تامة بالضبط في حالة انشطار دائم إلى نسخ أخرى». ولكنه كان متأثرًا بعمله، ورسالة الدكتوراه الخاصة بإيفرت والدراسة المتجددة لجراهام عن الظاهرة، وقد أخذ في اعتباره إلى أي مدى يمكن للانشطار أن يستمر في الحدوث. وفي عالم محدود — فهناك من الأسباب الجيدة للاعتقاد بأنه إذا كانت النسبية العامة وصف جيد للواقعية إذن فالكون محدود* — وعليه فلا بد أن يكون هناك عدد محدود فقط من «فروع» شجرة الكم، وببساطة فإن الفضاء الفائق قد لا يكون به مكان كاف ليقطنه المزيد من الاحتمالات الشاذة. وقد أطلق دي ويت على هذا التركيب الدقيق المدى «العوالم الخارجة عن السياق» الواقعية ذات أنماط سلوك مشوه بشكل غريب، وعلى أية حال، ومع أن تفسير إيفرت الصارم يقول إن أي شيء يحتمل أن يحدث في أي صورة من الواقعية، في مكان ما في الفضاء الفائق، فإن ذلك ليس الشيء نفسه كالقول إن أي شيء يمكن «تخيله» يمكن أن يحدث، ويمكن أن نتصور أشياء مستحيلة وأن العالم الواقعي لا يستطيع احتواءها. وفي عالم آخر مماثل لعالمنا حتى لو كانت للخنازير (المشابهة لخنازيرنا) أجنحة بطريقة ما، فإنها لن تستطيع

* تصف النسبية العامة أنظمة مغلقة، وفي الأصل كان أينشتاين قد صور الكون كنظام محدود مغلق. ومع أن العامة يتكلمون عن أكوان غير محدودة ومنفتحة، فمثل هذه الأكوان لا تشملها نظرية النسبية بشكل جيد، والطريقة التي يكون بها عالمنا مغلقًا هي أن يحتوي مادة كافية حتى يمكن للجاذبية أن تثني الزمكان حول نفسه، مثل ثني الزمكان حول ثقب أسود، وهذا الأمر يحتاج إلى مادة أكثر مما نراه في المجرات المرئية، لكن معظم المشاهدين لديناميكية الكون يقترحون أن الكون في الحقيقة في حالة قريبة من الانغلاق؛ إما «مغلق بالكاد» أو «منفتح بالكاد»، وفي هذه الحالة ليست هناك مشاهدة مقنعة لرفض التضمينات الأساسية للنسبية بأن الكون مغلق ومحدود، وهناك كل الأسباب التي تدفعنا لنبحث عن المادة السوداء التي تحافظ عليه متماسكًا جاذبيًّا، ويمكن أن نجد بعض أسس هذه الأفكار في إسهامات ويلر في كتاب بعض الغرائب في التناسب.

الطيران، والأبطال مهما كانوا فائقين، لن يستطيعوا الإفلات بالطرق الجانبية من خلال الشقوق في الزمان لزيارة الواقعيات البديلة، حتى بالرغم من أن كتاب الخيال العلمي يفكرون حول تتابعات مثل هذه الأحداث، وهكذا أنهى دي ويت مقاله بطريقة درامية مثلما فعل ويلر من قبل:

> إن الرؤية التي تناولها إيفرت وويلر وجراهام مثيرة للإعجاب حقًّا، إلا أنها رؤية سببية تمامًا، التي كان من الممكن حتى لأينشتاين أن يتقبلها ... وهي تزعم أنها الأفضل لتصبح النهاية الطبيعية لبرنامج تفسير بدأ بهايزنبرج سنة ١٩٢٥.

وربما يكون من الإنصاف عند هذه النقطة أن نذكر أن ويلر نفسه قد عبر حديثًا عن شكوكه حول العمل كله، حين أجاب على أحد السائلين في المؤتمر الذي عقد بمناسبة مئوية ميلاد أينشتاين، قائلا عن نظرية العوالم المتعددة: «أقر وأعترف أنني يجب أن أتوقف مرغمًا عن دعمي لوجهة النظر هذه في النهاية — تماما مثلما نصرتها في البداية — لأني أخشى أنها تحمل الكثير من حقيبة الميتافيزيقيا.»* ولا يجب أن يُقرأ هذا على أنه سحب للبساط من تحت أقدام تفسير إيفرت، وحقيقة أن أينشتاين قد غير فكره عن الأساس الإحصائي لم تسحب البساط من تحت أقدام ذلك التفسير، ولا أن ذلك يعني أن ما قاله ويلر سنة ١٩٥٧ لم يعد حقيقيًّا؛ فإنه مازال حقيقيًّا سنة ١٩٨٣، وبعيدًا عن نظرية إيفرت، لا يوجد نظام متسق مع نفسه جاهز لشرح ماذا تعني كنتمة الكون، ولكن تغيير ويلر لعقيدته يظهر كيف كان من الصعب أن يتقبل العديد من الناس نظرية العوالم المتعددة. وأنا شخصيًّا أجد أن حمل الميتافيزيقيا المطلوب أقل اضطرابًا بكثير من تفسير كوبنهاجن لتجربة شرودنجر مع القطة، أو يتطلب أبعادًا «لطور الفضاء» عددها أكبر ثلاث مرات من عدد الجسيمات في الكون. ولم تعد المفاهيم أكثر غرابة من المفاهيم التي أصبحت مألوفة لمجرد أنها نوقشت

* بعض غرائب التناسب تحرير هارى وولف صفحات ٣٥٨–٣٨٦.

بإسهاب على الملأ، وأن تفسير العوالم المتعددة يقدم منظورًا جديدًا عن لماذا يجب أن يكون الكون الذي نعيش فيه في الصورة التي هو عليها؟ إن النظرية بعيدة جدًّا عن أن تُهْمل، ومازالت تستحق اهتمامًا جادًّا.

ما بعد إيفرت

يتكلم علماء الكون اليوم بسعادة بالغة عن الأحداث التي حدثت عند لحظة ميلاد الكون في الانفجار الكبير، ويدرسون التفاعلات التي حدثت عندما كان عمر الكون $١٠^{-٣٥}$ ثانية أو أقل، وتتضمن التفاعلات اضطرابًا عظيمًا للجسيمات والإشعاع وكذلك إنتاج أزواج ودمار، والافتراضات حول كيفية حدوث هذه التفاعلات تأتي من خليط من النظرية والمشاهدات للطريقة التي تتداخل بها الجسيمات في معجلات عملاقة مثل ما يحدث في معجل سيرن (CERN) في جنيف. ووفقًا لتلك الحسابات فإن قوانين الفيزياء الناتجة من تجاربنا البسيطة هنا على الأرض تستطيع أن تفسر بشكل منطقي ومتسق مع نفسه كيف للكون أن يصل من حالة الكثافة غير المحدودة غالبًا إلى الحالة التي نراه عليها هذه الأيام. وتحاول النظريات أن تتنبأ بالتوازن بين المادة والمادة المضادة في الكون وبين المادة والإشعاع،* وقد سمع بها كل إنسان مهتم بالعلم، سواء على نحو معتدل أو كناقلين لاهتمامهم بنظرية الانفجار الكبير لأصل الكون، ويلعب النظريون وهم سعداء بالأرقام التي تصف الأحداث التي يزعمون حدوثها خلال أجزاء من الثانية منذ حوالي ١٥ ألف مليون سنة مضت، ولكن من في هذه الأيام يتوقف ليتأمل فيما تعنيه حقيقة هذه الأفكار؟ إنه بالقطع أمر يفجر العقل إذا حاولت أن تفهم التضمينات التي في هذه الأفكار؛ من سيقدر رقمًا مثل $١٠^{-٣٥}$ من الثانية، وماذا يعني حقيقة إذا تركنا جانبًا كيف نستوعب طبيعة الكون عندما كان عمره $١٠^{-٣٥}$ ثانية؟ فالعلماء الذين يتعاملون مع مثل هذه الشواذ الفائقة للطبيعة لن يجدوا في الواقع أي صعوبة ليفتحوا عقولهم لاستقبال

* نوقشت كل هذه الأفكار في كتابي «التواءات الفضاء».

مفهوم العوالم المتوازية، وفي الواقع، يبدو هذا التعبير صائبًا، وهو مستعار من الخيال العلمي، لكنه ليس مناسبًا تمامًا؛ فالصورة الطبيعية للواقعيات البديلة ما هي إلا فروع تبادلية تفرعت من ساق رئيسية وينطلق بعضها بجانب بعض عبر الفضاء الفائق مثل خطوط السكك الحديدية المعقدة عند نقطة ارتكاز، ومثل طريق فائق السرعة، به ملايين الخطوط المتوازية، يتصور كتاب الخيال العلمي أن كل العوالم تتحرك جنبًا إلى جنب عبر الزمان، وأقرب هذه العوالم تماثل تقريبًا عالمنا، ثم يصبح الفارق بيننا أكثر وضوحًا وأكثر تباينًا كلما تحركنا أبعد «بالطرق الجانبية في الزمان». هذه هي الصورة التي قد تقودنا بشكل طبيعي إلى افتراض احتمال تغيير سيرنا على الطريق فائق السرعة من حارة إلى أخرى، منزلقين إلى العالم المجاور، ولسوء الحظ فإن الرياضيات ليست تمامًا بمثل هذه الصورة الواضحة.

لم يجد الرياضيون صعوبة في التعامل مع أبعاد أكثر من الأبعاد الفضائية الثلاثة المألوفة، وهي في غاية الأهمية في حياتنا اليومية. وعالمنا الكلى — الذي هو أحد فروع واقعية العوالم المتعددة لإيفرت — قد وُصِفَ رياضيًّا بأربعة أبعاد؛ ثلاثة للفضاء، وواحد للزمان، كلها تصنع زوايا قائمة بعضها مع بعض، والرياضيات المطلوبة لوصف أبعاد أكثر تصنع زوايا قائمة بعضها مع بعض ومع أبعادنا الأربعة هو أمر روتيني يجري التلاعب به، وهذا هو أين تقع الواقعيات البديلة فعلًا، التي ليست متوازية مع عالمنا لكنها تصنع زوايا قائمة معه، عوالم متعامدة ومتفرعة «بطرق جانبية» خلال الفضاء الفائق. ويصعب أن نتخيل هذه الصورة،* لكن ذلك يجعل الأمر

* إذا وجدت صعوبة في تصديق ذلك، فربما تكون قد بدأت تشعر بأن معادلة شرودنجر القديمة الطيبة أكثر مناسبة ومريحة أكثر، والأمر أبعد من ذلك، حيث يبدأ التفسير الموجي لميكانيكا الكم بمعادلة بسيطة مألوفة للموجة من مجالات أخرى للفيزياء. وبالنسبة لجسيمة وحيدة فإن الوصف الصحيح لميكانيكا الكم يتضمن موجة في ثلاثة أبعاد مع أنها ليست في فضائنا اليومي، ولكن في شيء يسمى «الفضاء الشكلي»، ولسوء الحظ فإنك تحتاج ثلاثة أبعاد مختلفة للموجة لكل جسيمة موجودة في هذا الوصف، فلكي تصف جسيمتين متداخلتين فإنك تحتاج إلى تسعة أبعاد وهكذا. وعليه فإن دالة الموجة للكون ككل — في هذا المعنى — هي دالة موجة تتضمن ثلاثة أضعاف من الأبعاد أكثر مما يحتويه الكون من جسيمات. والفيزيائيون الذين يرفضون تفسير إيفرت للواقع على أنه مثل حمل حقائق أكثر من اللازم، فهم ينسون وهم مرتاحون أن دالات الموجات التي يستخدمونها كل يوم يمكن تقبلها فقط كوصف جيد للكون بإقحام حمل مساو، يتعب العقل، من الأحمال لمزيد من الأبعاد.

أكثر سهولة حتى نرى لماذا يستحيل انزلاقه بطرق جانبية إلى واقع بديل. إذا انفصلت بزاوية قائمة بالنسبة لعالمنا — بطرق جانبية — فإنك بذلك تكون قد كونت عالمًا جديدًا خاصًّا بك، وحقيقة وعلى أساس نظرية العوالم المتعددة فإن هذا ما يحدث عندما يواجه الكون باختيار كمي، والطريقة الوحيدة التي يمكن بها أن تحصل على واحدة من الواقعيات البديلة التي تكونت بانشطار للكون مثل هذا نتيجة تجربة القطة في الصندوق أو تجربة الثقبين، يمكن أن تحدث بأن ترجع في الزمان في واقعنا الخاص بنا ذي الأبعاد الأربعة إلى زمن التجربة، وحينئذ نذهب إلى الأمام في الزمان عبر الفرع البديل الذي يصنع زوايا قائمة بالنسبة لعالمنا ذي الأبعاد الأربعة.

وربما يكون ذلك مستحيلًا؛ إن الحكمة المصطلح عليها بأن السفر الحقيقي عبر الزمان لا بد أن يكون مستحيلًا لما به من تناقض كتلك الحالة التي ترجع فيها في الزمان وتَقتل جدك قبل أن يولد والدك. ومن ناحية أخرى فإن الجسيمات على المستوى الكمي تبدو مشغولة طول «الوقت» في السفر عبر الزمان، كما أن فرانك تيبلر (Frank Tipler) قد بين أن معادلات النسبية العامة تسمح بالسفر عبر الزمان، ومن الممكن أن نولد نوعًا من السفر الأصيل للأمام أو إلى الخلف في الزمان لا يسمح بالتناقض، ومثل هذا الشكل من السفر عبر الزمان يعتمد على واقعية الأكوان البديلة. وقد اختبر ديفيد جيرولد (David Gerrold) في كتاب مسل للخيال العلمي هذه الاحتمالات «الرجل الذي طوى نفسه» وهو كتاب يستحق القراءة كدليل على ما في واقع العوالم المتعددة من تعقيدات وسهولة. والمسألة أنه — إذا أخذنا المثال الكلاسيكي — وعدت للوراء في الزمان لتقتل جدك، فإنك (معتمدًا على وجهة نظرك) تدخل أو تخلق عالمًا بديلًا تفرع بزاوية قائمة مع العالم الذي بدأت فيه، وفي هذا الواقع «الجديد» لم يكن أبوك ولا حتى أنت نفسك قد ولدتما، لكن ليس هناك تناقض لأنك قد ولدت بالفعل في الواقع «الأصلي» وتقوم بالرحلة إلى الوراء عبر الزمان وفي فرع بديل، عد مرة ثانية وأصلح ما أفسدته، وكل ما ستفعله هو أن تعود إلى الفرع الأصلي للواقع أو على الأقل واقع شبيه به.

ولم يشرح أحد — حتى جيرولد نفسه — هذه الأحداث الغريبة التي تحدث لشخصيته الرئيسية بمدلول الواقعيات المتعامدة، وعلى مدى علمي فإن التفسير الفيزيائي لرياضيات تفسير إيفرت هو أصلي، ومن المؤكد أنه تحوير جديد لملحمة السفر عبر الزمان التي لم يتطرق لها كتاب الخيال العلمي حتى الآن، وهاأنذا أقدمها لهم.* والنقطة التي تستحق التركيز عليها هو أن الواقعيات البديلة، في هذه الصورة، موجودة «جنبًا إلى جنب» مع واقعنا، حيث إنها تستطيع أن تنفلت للداخل أو للخارج بقليل من الجهد، ويصنع كل فرع من فروع الواقعية زاوية قائمة بالنسبة للفروع الأخرى. وربما يوجد عالم فيه بونابرت قد سمي بيير، وليس نابليون، ولكن، وحيث إنه على الجانب الآخر ينساب التاريخ بصورة أساسية كما هو في فرعنا من الواقعية، ربما هناك عالم لم يكن فيه هذا البونابرت المعين بالمرة، وكلا الرأيين بعيد الاحتمال وغير متاح في عالمنا، ولا يمكن الوصول إليهما إلا إذا سافرنا للوراء عبر الزمان في عالمنا الخاص بنا على نقطة التفرع المناسبة ثم الانطلاق للأمام مرة ثانية بزوايا قائمة (زاوية واحدة من الزوايا القائمة العديدة!) إلى واقعنا.

يمكن أن يمتد المفهوم ليزيل الطبيعة المتناقضة لأي تناقض للسفر عبر الزمان المفضل لدى كتاب وقراء الخيال العلمي، الذي ناقشه الفلاسفة، وكل الأشياء المحتملة تحدث بالفعل في بعض فروع الواقعية. والأمر المحوري للدخول إلى تلك الواقعيات المحتملة عبر الزمان، بالطرق الجانبية، إلى الوراء ثم إلى الأمام في فرع آخر. ومن المحتمل أن أفضل روايات الخيال العلمي التي كتبت على الإطلاق قد استفادت من تفسير العوالم المتعددة، إلا أنني لست متأكدًا أن المؤلف جريجوري بينفورد Gregory Benford قد فعل ذلك وهو على وعي به؛ تبدل مصير العالم في كتابه «هروب الزمان» جذريًا نتيجة للرسائل التي أرسلت إلى الوراء إلى ستينيات القرن العشرين من تسعينياته. وقد نوقشت القصة بشكل جميل وأخاذ لتشغل مكانها الصحيح

* بينما هذا الكتاب في طريقه للنشر، كتبت قصة قصيرة بعنوان «العوالم المتعامدة» لمجلة أنالوج، مستخدمًا هذا الموضوع.

حتى بدون موضوع الخيال العلمي. ولكن النقطة التي أردت التقاطها هنا هي أنه لأن العالم يتغير نتيجة أحداث حدثت بواسطة أناس استقبلوا رسائل من المستقبل، هذا المستقبل الذي أتت منه الرسائل ليس له وجود بالنسبة لهم، وعليه فمن أين أتت هذه الرسائل؟ ربما تستطيع أن تكون حالة في تفسير كوبنهاجن القديم لعالم شبحي يرسل للوراء رسائل شبحية تؤثر على الطريقة التي تنهار بها دالة الموجة، ولكنك ستتعرض لضغط شديد لتجعل دوافعك مقبولة. وعلى الجانب الآخر فإنه أمر واضح تماما أن نرى رسائل تذهب إلى الوراء في الزمان في تفسير العوالم المتعددة إلى نقطة تفرع حيث يستقبلها الذين يتحركون حينئذ إلى الأمام في الزمان إلى فرع مختلف للواقعية خاص بهم. وكل من العاملين التبادلين موجود، والاتصال بينهما منقطع في اللحظة التي تُتَّخذ فيها القرارات الحاسمة التي تؤثر في المستقبل.* وكما أن «هروب الزمن» جيد للقراءة، فإنه يحتوي بالفعل على «تجربة ذهنية» مثيرة، بكل ما في الكلمة، ومتمشية مع جدال ميكانيكا الكم وكذلك تجربة EPR أو قطة شرودنجر. وربما لم يقدر ذلك شرودنجر نفسه، ولكن واقع العوالم المتعددة هو بالضبط نوع من الواقع يسمح بالسفر عبر الزمان، وهو أيضا نوع من الواقع يشرح لماذا يجب أن نكون هنا لنناقش مثل هذه الموضوعات.

مكاننا الخاص

وفقا لتفسيري لنظرية العوالم المتعددة، فإن المستقبل لا يتقرر من حيث إدراكنا الحسي الواعي للعالم المعني، لكن الماضي محدد، وبفعل الملاحظة فقد اخترنا تاريخًا «واقعيًّا» من بين الواقعيات العديدة، فبمجرد أن رأى شخصٌ ما شجرة في عالمنا، فإنها تظل هناك حتى عندما لا ينظر إليها

* هناك عنصر آخر يستحق التأكيد عليه هنا؛ فحتى لو كان السفر عبر الزمان ممكنًا نظريًّا، فربما توجد صعوبات عملية لا يمكن التغلب عليها تمنعنا من إرسال أشياء مادية عبر الزمان. ولكن إرسال الرسائل عبر الزمان يمكن أن يكون أمرًا بسيطًا نسبيًّا إذا وجدنا طريقة للاستفادة من الجسيمات التي تسافر إلى الوراء في الزمان في تفسيرات فينمان للواقعية.

أحد، وينطبق هذا على كل شيء إلى الوراء حتى الانفجار الكبير. وعند كل وصلة على الطريق السريع للكم، ربما يكون قد تكوَّن العديد من الواقعيات الجديدة، ولكن ما وصل إلينا واضح وغير مبهم، وهناك العديد من الطرق التي تصل إلى المستقبل، إلا أن بعض نسخ «منا» ستتبع كل واحد منها، وستعتقد كل نسخة منا أنها تسلك مسلكًا فريدًا، وسننظر إلى الوراء إلى ماضٍ فريد، لكن من المستحيل أن نعرف المستقبل، حيث إن به مسارات عديدة، وربما نستقبل رسائل من المستقبل، إما بواسطة وسائل ميكانيكية مثل «هروب الزمن»، أو إذا أردت أن تتصور احتمال حدوث ذلك من خلال الأحلام، أو بالإدراك الخارج عن النطاق الحسي، لكن من غير المحتمل جدًّا أن تكون تلك الرسائل ذات فائدة كبيرة لنا، وحيث إنه قد توجد أعداد وافرة من عوالم المستقبل، فإن أي رسائل مثل هذه يجب أن تتوقع أنها مشوشة ومتضاربة، وإذا تصرفنا بناءً على هذه الرسائل فإن الاحتمال الأكثر أن نحيد بأنفسنا إلى فرع من الواقعية مختلف عن الذي جاءت منه «الرسائل»، وعليه فإنه من غير الممكن جدًّا أن تستطيع هذه الرسائل «أن تصبح صحيحة». والناس الذين يقترحون أن نظرية الكم تقدم مفتاحًا لتفسير الإدراك الخارج عن النطاق الحسي (ESP) عمليًّا، وأنه تخاطر عن بعد وخلافه، إنما يضللون أنفسهم.

وصورة الكون كما يصورها شكل فينمان المبسوط التي تتحرك فيها «اللحظة الحاضرة» بمعدل ثابت أمر مبسط أكثر من اللازم، والصورة الواقعية هي شكل فينمان متعدد الأبعاد، به كل العوالم المحتملة، وبه «اللحظة الحاضرة» تنتشر عبرهم جميعًا مرتقبة كل فرع وكل بديل، والسؤال الأعظم الذي تُرِكَ للإجابة عنه في هذا الإطار هو: لماذا يجب أن يكون إدراكنا الحسي عن الواقع بالشكل الذي هو عليه؟ ولماذا يجب اختيار الممرات عبر متاهة الكم التي بدأت منذ الانفجار الكبير وأدت إلى كوننا النوع الصحيح فقط وبالضبط من الممرات لظهور الذكاء في الكون؟

يقع الجواب في فكرة غالبًا يُرجع إليها هي «المبدأ الإنساني» ويقول هذا المبدأ الإنسانى إن الظروف التي وجدت في الكون هي الظروف الوحيدة فقط،

بعيدًا عن أي تغيرات صغيرة، والتي قد تسمح لحياة مثلنا أن تنشأ، وعليه فإنه من الحتمي أن أي أنواع ذكية مثلنا لا بد أن تتطلع إلى كون مثل ذلك الذي نراه حولنا.* وإذا لم يكن الكون على الشكل الذي هو عليه، فلن نكون هنا لنلاحظه، ونستطيع أن نتخيل الكون يتخذ ممرات كمية عديدة ومختلفة للأمام بدءًا من الانفجار الكبير، وفي بعض تلك العوالم — وبسبب الاختلافات في الاختبارات الكمية التي حدثت بالقرب من بداية تمدد الكون — فإن النجوم والكواكب لن تتشكل أبدًا، ولن توجد الحياة التي نعرفها، وإذا أخذنا مثالًا معينًا، ففي كوننا يبدو وكأنه يوجد فيض كبير من الجسيمات المادية وقليل — أو لا يوجد شيء — من المادة المضادة، وربما لا يوجد سبب أساسي لذلك، وربما يكون هذا مجرد صدفة لطريقة التفاعلات التي حدثت أثناء طور الكرة النارية في الانفجار الكبير، والأمر المحتمل هو أن يكون الكون فارغًا، أو أنه يجب أن يتكون أساسًا مما نسميه المادة المضادة، مع وجود قليل من المادة أو عدم وجودها بالمرة. ولا توجد حياة في الكون الفارغ، وفي عالم المادة المضادة قد تكون هناك حياة كحياتنا تمامًا، نوع من نظرة لعالم زجاجي أصبح واقعيًّا، واللغز هنا لماذا يجب أن يظهر عالم مثالي للحياة من الانفجار الكبير.

وينص المبدأ الإنساني على أنه ربما يوجد عوالم محتملة عديدة، وأننا بلا جدال نتاج نوعنا من الكون، ولكن أين العوالم الأخرى؟ وهل هي أشباح مثل العوامل المتداخلة في تفسير كوبنهاجن؟ وهل تعبر عن حلقات حياة مختلفة للعالم ككل قبل الانفجار الكبير الذي بدأ به الزمان والفضاء كما نعرفهما نحن؟ أم هل هي عوالم إيفرت المتعددة، التي توجد كلها بزوايا قائمة مع عالمنا؟ يبدو لي أن هذا أفضل تفسير حتى اليوم، وأنه حل اللغز الأساسي حول لماذا نرى الكون على الشكل الذي يعوض بوفرة الحمل الثقيل الذي يحمله تفسير إيفرت. ومعظم الواقعيات الكمية البديلة غير مناسبة للحياة أو هي فارغة، والظروف الصحيحة المناسبة للحياة هي ظروف

* وقد ناقشت المبدأ الإنساني باختصار في كتابي «التواء الفضاء»، ويمكنك أن تجد تفاصيل أكثر في «العالم بالصدفة» لبولي ديفيز. وكتابي «التكوين الأصلي» يشرح بالتفصيل أصل الانفجار الكبير للكون.

خاصة، وعليه فإن الكائنات الحية عندما تنظر إلى الوراء في ممر الكم الذي أنتجها نفسها، فإنهم يرون أحداثًا خاصة، وفروعًا في طريق الكم التي هي ربما لا تكون الأكثر احتمالاً على أساس إحصائي، ولكنها هي التي تفضي إلى حياة ذكية. إن تعدد عوالم مثل عالمنا ولكن بتواريخ مختلفة — التي فيها مازالت بريطانيا تحكم مستعمرات شمال أمريكا، أو فيها السكان الأصليون لأمريكا يستعمرون أوربا — وهؤلاء يكونون معًا ركنًا واحدًا صغيرًا فقط لواقع أكثر اتساعًا بكثير، وليس صدفة أنه قد جرى انتقاء الظروف الخاصة المناسبة للحياة من بين العديد من الاحتمالات الكمية، لكنه اختيار، وكل العوالم واقعية بالدرجة نفسها، لكن العوالم المناسبة فقط هي التي تتضمن مشاهدين.

إن نجاح تجارب فريق أسبكت لاختبار عدم مساواة بل قد أزاح كل احتمالات تفسيرات ميكانيكا الكم الممكنة، التي وجدت ماعدا اثنين؛ فإما أن نتقبل تفسير كوبنهاجن، مع واقعياته الشبحية والقطط نصف الميتة، أو نتقبل تفسير إيفرت وعوالمه المتعددة. ومن الطبيعي أن أيًّا من «أحسن المشتريات» هاتين في سوق العلوم، يمكن تصور أنها غير صحيحة، وإن كليهما (البديلين) على خطأ، وربما مازال هناك تفسير آخر لواقع ميكانيكا الكم يحل الألغاز التي يحلها تفسير كوبنهاجن وتفسير إيفرت، ويحتوي اختبار بل ويذهب أبعد من مفهومنا الحالي — وبنفس الطريقة — ربما يتجاوز النسبية العامة ويحتضن النسبية الخاصة. وإذا كنت تعتقد أن هذا هو الفرض الأسهل، طريق سهل للخروج من المأزق فلتتذكر أن أي تفسير «جديد» مثل هذا يجب أن يوضح كل شيء قد تعلمناه، مثل قفزة بلانك الكبيرة في الظلام، ويجب أن يشرح كل شيء بالمثل أو «أفضل» من التفسيرين الحاليين، وهذه من المؤكد قائمة طويلة من المتطلبات، وأنه ليس من المعتاد أن يجلس العلم قابعًا ويأمل أن شخصًا ما سيأتى بإجابة «أفضل» لمشاكلنا، وفي حالة عدم وجود إجابة أفضل، علينا أن نقبل بتضمينات أفضل الأجوبة التي لدينا. والكتابة في ثمانينات القرن العشرين وبعد مجهود معين لأكثر من نصف قرن مكرس للغز الواقع الكمي بواسطة أفضل أدمغة هذا القرن،

وعلينا أن نتقبل أن العلم قادر في الوقت الحالي فقط أن يقدم هذين البديلين التوضيحيين، الذين قد صُمِّمَ العالم بواسطتهما، ولا يبدو أن أيًّا منهما مستساغ جدًّا عند النظرة الأولى، وبلغة بسيطة إما أن لا شيء واقعي، أو أن كل شيء واقعي.

وربما لن يحل الموضوع أبدًا، لأنه قد يكون من المستحيل تعميم تجربة تفرق بين التفسيرين، ومفيدة للسفر عبر الزمن، ولكن من الواضح تمامًا أن ماكس جامير، وهو واحد من أقدر فلاسفة الكم، لم يكن مبالغًا عندما قال إن نظرية العوالم المتعددة هي بلا شك واحدة من أكثر النظريات جرأة وأكثرها طموحًا التي صُمِّمَت على الإطلاق في تاريخ العلوم،* وهي تشرح حرفيًّا وتمامًا كل شيء بما في ذلك حياة وموت القطط. وكمتفائل لا يكل، فإن ذلك هو التفسير المستحب إلى نفسي لميكانيكا الكم على الأغلب، وكل الأشياء محتملة، وبأفعالنا نختار مساراتنا الخاصة خلال عوالم الكم المتعددة. وفي العالم الذي نعيش فيه، ما تراه هو الذي تحصل عليه، وليس هناك متغيرات مخبأة، إن الرب لا يلعب النرد، وكل شيء واقع، وأحد النوادر التي تقال ويعاد ترديدها عن نيلس بور أنه عندما جاء إليه شخص ما يقترح حل أحد ألغاز نظرية الكم في عشرينيات القرن العشرين، أجابه قائلًا: «نظريتك مجنونة، لكنها ليست مجنونة بما فيه الكفاية لتكون حقيقية.»† ومن وجهة نظري فإن نظرية إيفرت مجنونة بما فيه الكفاية لتكون حقيقية، ويبدو ذلك كإشارة مناسبة نختتم بها بحثنا عن قطة شرودنجر.

---

* فلسفة ميكانيكا الكم صفحة ٥١٧.

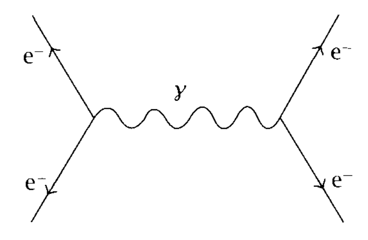
† مقتبسة، مثلًا، من روبرت ويلسون، «العالم المجاور» صفحة ١٥٦.

خاتمة

عمل غير مكتمل

يبدو أن قصة الكم كما عرضتها هنا مختصرة بأناقة وخالية من الحشو، ماعدا السؤال شبه الفلسفي: لماذا كنت تفضل تفسير كوبنهاجن أو نسخة العوالم المتعددة؟ وهذه أفضل طريقة لعرض القصة في كتاب، لكنها ليست كل الحقيقة، فقصة الكم لم تنته بعد، ولا يزال النظريون إلى اليوم يتصارعون مع مشكلات ربما تؤدي إلى خطوة أساسية للأمام، مثل الخطوة التي اتخذها بور عندما كنتم الذرة. ومحاولة الكتابة عن هذا العمل الذي لم ينته هو شيء مزعج وغير مريح، والرؤية المقبولة لما هو مهم، ولما يمكن إهماله بأمان ربما تتغير تمامًا عندما يمثل هذا التقرير إلى الطبع، ولكن حتى نعطيك مذاقًا للكيفية التي قد تتطور بها الأشياء، سأضمن في هذه الخاتمة تقريرًا عن النقاط التي لم تكتمل في قصة الكم وبعض التلميحات عما قد تعتني به في المستقبل.

وأوضح إشارة على إنه لا يزال هناك الكثير للنظرية الكمية أكثير مما تقابله العين يأتي من فرع من نظرية الكم الذي هو بمثابة جوهرة التاج، وهو أعظم نصر للنظرية، هذه هي الكهروديناميكية الكمية أو باختصار QED، وهي النظرية التي «تشرح» تداخل الكهرومغناطيسية بمدلول الكم؛ ازدهرت QED في أربعينيات القرن العشرين، وبرهنت أنها ناجحة لدرجة أنها أصبحت



شكل خ-١: شكل فينمان الكلاسيكي لتداخلات الجسيمة.

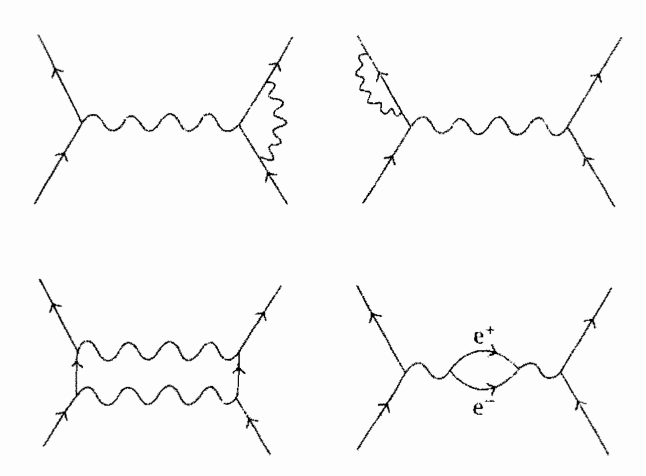
تستخدم كنموذج لنظرية التداخل النووي القوى، وهي النظرية التي تلقب بدورها الكروموديناميكية الكمية، أو QCD للاختصار، لأنها تتضمن تداخل جسيمات تدعى كواركات، لها خصائص يميزها النظريون، بطرافة، بعنونتها بأسماء الألوان. إلا أن QED نفسها لها عيب خطير، ولا تصلح النظرية فقط إلا كنتيجة للتلاعب بالرياضيات لجعلها تناسب مشاهداتنا للعالم.

تعود المشكلات إلى الطريقة التي فيها الإلكترون في نظرية الكم ليس الجسيمة العارية الموجودة في النظرية الكلاسيكية، لكنه محاط بسحابة من الجسيمات الخيالية، وهذه السحابة من الجسيمات لا بد أن تؤثر على كتلة الإلكترون، ومن الممكن جدًّا أن نجهز معادلات الكم لتعبر عن إلكترون + سحابة، ولكن كلما تم حل هذه المعادلات رياضيًّا أعطت «إجابات» لانهائية في الكبر. وإذا بدأنا بمعدلات شرودنجر، حجر الزاوية في طهي الكم، فالمعالجة الرياضية الصحيحة للإلكترون تعطي كتلة لانهائية وطاقة لانهائية وشحنة لانهائية، وليس هناك طريقة رياضية شرعية للتخلص من هذه اللانهائيات، لكن من الممكن التخلص منها بالغش؛ فنحن نعرف ماهى كتلة الإلكترون بالقياسات التجريبية المباشرة، ونعرف أن هذه هي الإجابة التي يجب على النظرية أن تعطيها لنا لكتلة الإلكترون + السحابة، وعليه يزيل النظريون اللانهائية من المعادلات، وفي الواقع تُقسم إحدى اللانهائيات على أخرى، ورياضيًّا إذا قسمت لانهائي على آخر فستحصل عمومًا على أي إجابة، وعليه فإنهم يقولون إن الجواب لا بد أن يكون هو الجواب الذي نريده، أي الكتلة المقاسه للإلكترون، وتسمى هذه الخدعة إعادة التطبيع.

وحتى نحصل على صورة لما يجري، تخيل شخصًا ما يزن ١٥٠ رطلًا يذهب إلى القمر، حيث قوى الجاذبية على سطحه هي سدس قوى الجاذبية على سطح الأرض فقط، وبمقياس ميزان الحمام المألوف على سطح الأرض، وأخذه في الرحلة إلى القمر، فإن وزن المسافر سيسجل فقط ٢٥ رطلًا، مع أن جسمه لم يفقد أي كتلة. وفي مثل هذه الظروف من المعقول، ربما أن «نعيد تطبيع» ميزان الحمام ليقرأ المؤشر من جديد وزنًا قدره ١٥٠ رطلًا، وهنا لا بد من تحريك المؤشر حتى يعطي هذه لقراءة، ولكن الخدعة تصلح فقط لأننا نعلم وزن المسافر الحقيقي، بمقياس الأرض، وأننا نود أن نحافظ على سجلاتنا بمقاييس الأرض، فإذا سجل المقياس وزنًا لانهائيًّا، فإننا يمكن أن نعدل فقط بأن نجري تصحيحًا لانهائيًّا، وهذا ما يفعله منظرو الكم فى QED. (الكهربية الديناميكية الكمية). ولسوء الحظ، ومع أن قسمة ١٥٠ على ٦ تعطي دون أدنى شك نتيجة مقدارها ٢٥، فإن ٢٥ مضروبة في ما لانهاية ثم مقسومة على ما لانهاية، لا تعطي بلا شك الجواب ٢٥، بل يمكن أن تعطي أي إجابة على الإطلاق.

ومع ذلك، فالخدعة قوية بدرجة هائلة؛ فبإلغاء اللانهائيات بعضها لبعض، تفعل حلول معادلة شرودنجر كل شيء قد يرغب فيه الفيزيائيون، وتصف بشكل مثاليى أكثر التأثيرات شفافية لتداخلات الكهرومغناطيسية على الأطياف الذرية، والنتائج مثالية، وعليه فإن معظم الفيزيائيين يتقبلون QED كنظرية جيدة ولا تقلقهم اللانهائيات، تمامًا كما فعل طهاة الكم عندما لم يهتموا بتفسير كوبنهاجن أو مبدأ عدم التيقن. وحقيقة أن الخدعة صالحة لا تنفي كونها خدعة، والشخص الوحيد الذي يجب أن تحظى فكرته بأقصى احترام بالنسبة لنظرية الكم يظل غير سعيد بشكل عميق فيما يتعلق بهذه الخدعة، وفي محاضرة في نيوزيلندا حديثًا سنة ١٩٧٥* علق بول ديراك:

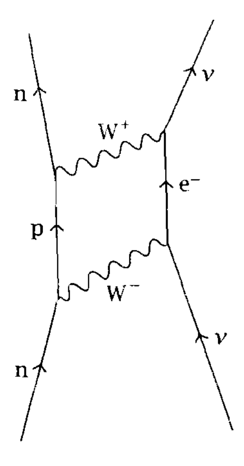
* «اتجاهات الفيزياء»، لم يكن ديراك وحده فيما يتعلق بذلك، ولقد وصف بانيش هوفمان (Banesh Hoffmann) في كتاب «قصة الكم الغريبة» صفحة ٢١٣ إعادة التطبيع كأمر يقود الفيزياء إلى مأزق، «والتلاعب الجريء باللانهائيات أمر ذكي فوق العادة، ويبدو أن هذا الذكاء يضيء ممرًا ضيقًا مظلمًا».



شكل خ-٢: تنشأ التصويبات الكمية لقوانين الكهربية الديناميكية بسبب وجود الجسيمات الخيالية؛ الأشكال ذات الحلقات المغلقة، وهذه هي الظروف المؤدية إلى اللانهائيات التي يمكن فقط إزالتها بواسطة الحيلة غير المقنعة لإعادة التطبيع.

لست مرتاحًا جدًا بالوضع، لأن ما يطلق عليه «النظرية الجيدة» تتضمن إهمال اللانهائيات التي تظهر في معادلاتها، إهمالها بطريقة اختيارية، وليست هذه فقط رياضيات واقعية؛ فالرياضيات الواقعية تتضمن إهمال كمية عندما تكون هذه الكمية ضئيلة، وليس إهمالها لأنها كبيرة إلى ما لانهاية، وأنك لا ترغب فيها.

وبعد أن أوضح ذلك من وجه نظره «ليست لمعادلة شرودنجر حلول»، ختم ديراك محاضرته بأن أكد على أنه لا بد من تغيير جذري في النظرية لجعلها معقولة رياضيًا. «فالتغييرات البسيطة لن تكون هي الحل ... وإني أشعر أن التغيير المطلوب سيكون هائلًا مثل العبور من نظرية بور إلى ميكانيكا الكم.» وأين نستطيع البحث عن مثل هذه النظرية؟ إذا كنت أملك الإجابة فإنني أكون في طريقي للفوز بجائزة نوبل الخاصة بي، ولكننى



شكل خ-٣: تبادل زوج م W بوزونات بين نيوترينو ونيوترون كاف ليتطلب تصحيحًا لانهائيًّا للحسابات، مقارنة بتبادل بوزون مفرد.

قد أستطيع أن ألفت انتباهكم لبعض التطورات المثيرة النابعة من الفيزياء اليوم، التي ربما في النهاية تفي بمتطلبات تقصيات ديراك الفاحصة لما يكوِّن نظرية جيدة.

الزمكان الملتوي

ربما يقع الطريق لفهم أفضل لطبيعة الكون في الجزء الخاص بالعلم الفيزيائي الذي أهمل كثيرًا حتى الآن في نظرية الكم، وتدلنا ميكانيكا الكم على الكثير عن جسيمات المادة، ولكنها تفعل ذلك بشكل شحيح جدًّا أو قد لا تدلنا بأي شيء على الإطلاق عن الفضاء الخالي، ولكن كما علق إدنجتون منذ أكثر من خمسين عامًا مضت فى «طبيعة العالم الفيزيائي»، حيث ذكر أن الثورة التي كونت صورتنا عن المادة الجامدة كفضاء خال كبير جدًّا هي أساسية بدرجة أكبر من الثورة التي جاءت بالنظرية النسبية، وحتى جسم جامد مثل مكتبي، أو هذا الكتاب، هو في الواقع في أغلبه فراغ خال؛ فنسبة

المادة إلى الفضاء أقل حتى من نسبة حبة رمل إلى قاعة ألبرت. والشيء الوحيد الذي يبدو أن نظرية الكم تخبرنا به عن نسبه الـ٩٩,٩٩٩٩٩ المهملة في الكون ... أنها عدد هائل من الجسيمات الخيالية يموج بالنشاط. ولسوء الحظ فإن معادلات الكم نفسها تؤدي إلى حلول لانهائية في QED وتخبرنا أيضًا أن كثافة الطاقة للفراغ هي لانهائية، ولا بد من تطبيق إعادة التطبيع حتى على الفضاء الخالي، وعندما نربط معادلات الكم القياسية مع معادلات النسبية العامة لنحاول الوصول إلى وصف أفضل للواقع فإن الموقف يصبح أسوأ؛ فاللانهائيات مازالت تحدث، ولكنها الآن لا يمكن حتى إعادة تطبيعها، وبوضوح نحن نلاحق هدفًا غير الذي نقصده، ولكن ما الهدف الذي نقصده؟

عاد روجر بنروز (Roger Penrose) من جامعة أوكسفورد، إلى الأساسيات محاولًا الوصول إلى تقدم، وقد بحث عن طرق مختلفة ليرسم وصفًا هندسيًّا للفراغ وللجسيمات في الفراغ، هندسيات تتضمن زمكانًا مشوهًا، وقطعًا ملتوية للزمكان، التي نلاحظها كجسيمات، ولأسباب واضحة، أطلق على النظرية نظرية اللولب أو توسيتور twistor، ولسوء الحظ ليست الرياضيات فقط غير متاحة لمعظم الناس، بل النظرية نفسها أبعد من أن تكون كاملة. لكن المفهوم مهم — باستخدام نظرية واحدة — ويحاول بنروز تفسير كل من الجسيمات الدقيقة والأماكن الشاسعة من الفراغ داخل شيء جامد مثل هذا الكتاب، وربما تكون هذه النظرية الخطأ، ولكن بتعاملنا مع لب المشكلة التي أُهملت بشكل كبير، فإن هذا يسلط الضوء على أحد الأسباب المحتملة لفشل النظرية القياسية.

وهناك طرق أخرى لتصور تشوهات الزمكان على المستوى الكمي، فبربط ثابت الجاذبية وثابت بلانك وسرعة الضوء (الثوابت الثلاثة الأساسية في الفيزياء) من المحتمل الحصول على وحدة طول أساسية، فريدة وربما يظن أنها كوانتم الطول، الذي يمثل أصغر منطقة في الفراغ يمكن وصفها بشكل له معنى، وهي صغيرة جدًّا بكل تأكيد؛ حوالى $١٠^{-٣٥}$ متر وتسمى طول بلانك. وبالطريقة نفسها، وعند التلاعب بالثوابت الأساسية بطريقة

مختلفة نحصل على ناتج واحد، وواحد فقط، هو وحدة زمن أساسية؛ زمن بلانك الذي هو حوالى ١٠^-٤٣ ثانية.*

وقد أُهملت التموجات الكمية في هندسة الفراغ كلية على مستوى الذرات، أو حتى على مستوى الجسيمات الأولية، ولكن عند هذا المستوى الأساس يمكن اعتبار الفضاء نفسه بأنه رغوة من التموجات الكمية، وأن جون ويلر، الذي طور هذه الفكرة، قام بإجراء المقارنة بين المحيط الذي يبدو مسطحًا بالنسبة لملاح جوى يطير عاليًا فوقه، وبين راكبي قارب نجاة يتخبط بهم على سطح المحيط العاصف والمتغير دائمًا.† وقد يكون الزمكان نفسه، على المستوى الكمي معقدًا جدًّا طوبولوجيًّا، وبه «ثقوب دودية» و«جسور» تربط مناطق مختلفة من الزمكان؛ وبعبارة أخرى، وتبعًا لتنويعات الموضوع، فإن الفراغ الخالي ربما يتكون من ثقوب سوداء، في حجم طول بلانك مرصوصة بإحكام بعضها بجانب بعض.

وكل هذه أفكار مهمة ولكنها غير مقنعة ومحيرة، ولا توجد إجابات أساسية حتى الآن، ولكن ليس هناك أي ضرر في أن ندرك أن «فهمنا» للفضاء الخالي في الواقع مشوش وغير مؤكد ومبهم وغير مقنع. وإنه أمر يوسع من مداركنا أن نفكر مليًّا في أن كل الجسيمات المادية ربما لا تكون أكثر من أجزاء ملتوية من الفضاء الخالي، وإذا فكرنا في أن النظريات التي «نفهمها» تنهار، يحتمل حينئذ أن يأتي التقدم من أشياء لم نفهمها بعد، وربما يكون الأمر مهمًّا أن نراقب ما قد يأتي به مهندسو الكم في السنوات القليلة القادمة، وعلى كل فسنة ١٩٨٣ كانت عناوين الأخبار العلمية تهتم بنقطتين على طريق المعالجة القديم المألوف للتعامل مع الجسيمات في هذه المعضلة.

---

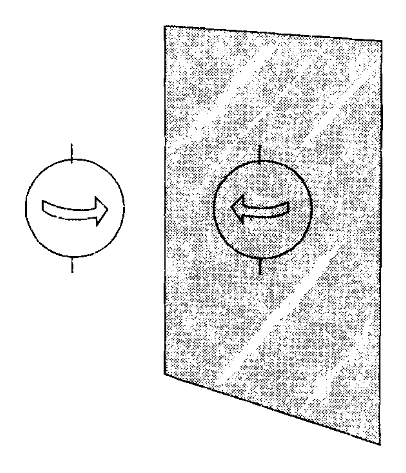
* إذا كنت في الواقع تريد أن تعرف فإن طول بلانك يحسب من الجذر التربيعى ل $G\hbar/c^3$، أما زمن بلانك فهو الجذر التربيعي ل $G\hbar/c^5$. وإنه لأمر غير ذي معنى أن نتكلم عن زمن أقصر من ذلك، أو أي بعد لفضاء أصغر من طول بلانك.

† انظر إسهام ويلر مثلًا في كتاب كيهرًا «الإدراك الحسي للفيزيائيين عن الطبيعة».

التماثل المكسور

التماثل مفهوم أساسي في الفيزياء. فالمعادلات الأساسية تماثلية في الزمان، فمثلًا، تعمل بالدرجة نفسها للأمام وللخلف في الزمان، ويمكن أن تُفهم التماثلات الأخرى بمصطلحات هندسية؛ فكُرة تدور مثلًا يمكن أن تنعكس من مرآة، وبالنظر إليها من أعلى، ربما تراها تدور ضد عقارب الساعة، وفي هذه الحالة ترى صورة المرآة تدور مع عقارب الساعة، لكن الكرة الحقيقية وصورة المرآة يتحركان بطرق مسموح بها في قوانين الفيزياء، التي هي تماثلية في هذا المفهوم (وطبيعي أن تكون الكرة في صورة المرآة تدور أيضًا، وبالضبط مثل الكرة الحقيقية التي يمكن أن تُرى تدور كما لو كان الزمان قد تحرك للوراء، وإذا انعكس الزمان وحدث انعكاس على المرآة سنرجع إلى حيث بدأنا). وهناك العديد من الأنواع الأخرى من التماثل في الطبيعة، وبعض هذه الأنواع سهل فهمه بلغة حياتنا اليومية — مثل الإلكترون والبوزيترون — يمكن أن نفكر بأنهما صورة مرآة كل منهما للأخر، تمامًا كما استطعنا أن نظن أن الزمن قد انعكس إلى الآخر؛ فالشحنة الموجبة المعكوسة هي شحنة سالبة، وأفكار الانعكاس هذه في الفضاء معًا (تسمى التغير المتماثل المتساوي لأنها تقايض اليسار باليمين)، فالانعكاس في الزمان وانعكاس الشحنة تكون واحدًا من أقوى المبادئ التي تقوم عليها الفيزياء (نظرية PCT) التي تنص على أن قوانين الفيزياء يجب ألا تتأثر بتغيير كل هؤلاء الثلاثة إلى نسخهم المضادة المنعكسة في الوقت نفسه، ونظرية الــPCT هي أساس الافتراض بأن انطلاق جسيمة يكافئ تمامًا امتصاص النسخة المضادة لجسيمتها المضادة.

ولكن التماثليات الأخرى أكثر صعوبة في استيعابها بلغة حياتنا اليومية وتتطلب لغة رياضية حتى تفهم كلية، وهذه التماثليات حاسمة لفهم آخر الأخبار على جبهة الجسيمات، وعلى كل، تصور مثالًا فيزيائيًا بسيطًا: فكر في كرة مستقرة على إحدى درجات سُلَّم؛ فإذا حركنا الكرة إلى درجة أخرى، فإننا نغير من طاقة وضعها في مجال الجاذبية الذي تقع فيه، ولا يهم



شكل خ-٤: تماثل الانعكاس: دوران الكرة في عالم المرآة هو نفسه مثل انعكاس الزمان لدورانها في العالم الواقعي.

الطريقة التي حركنا بها الكرة — من الممكن أن تأخذها في رحلة حول العالم أو ترسلها بصاروخ إلى المريخ ثم تعود بها قبل وضعها على الدرجة الجديدة — والشيء الوحيد الذي يحدد التغير في طاقة الوضع هو البعد بين الدرجتين، الدرجة التي بدأت منها وتلك التي وصلت إليها، ولا يهم من أين اخترنا بداية قياس طاقة الوضع؛ فقد نقيس من البدروم، ونعطي كل درجة طاقة وضع كبيرة، أو ربما نقيس من أول الدرجة السفلى نفسها، وفي هذه الحالة نرمز لطاقة وضع هذه الدرجة بصفر* وسيظل الفرق في طاقة الوضع بين الحالتين هو نفسه، وهذا نوع من التماثل، ولأننا نستطيع «إعادة تقدير» خط القاعدة الذي بدأنا منه القياس فإن مثل هذا التماثل يسمى تماثلًا تقديريًّا.

ويحدث الشيء نفسه مع القوى الكهربية؛ فالكهرومغناطيسية لماكسويل هي مقدار غير متغير. ونتيجة لذلك فإن QED نظرية تقديرية، وبالمثل QCD، التي تشكلت كنموذج على أساس QED. وقد ظهرت المصاعب عند التعامل مع

* وهذا مأخوذ من المدخل المستخدم بواسطة بول ديفيز في كتابه «قوى الطبيعة» دار نشر جامعة كمبريدج ١٩٧٩.

مجالات المادة على المستوى الكمي، ولكن من الممكن التوصل إلى حل مقنع لكل هذا بواسطة نظرية تظهر تماثلًا تقديريًّا، لكنها واحدة من السمات الحاسمة لـQED، أنها فقط متماثلة تقديريًّا، لأن كتلة الفوتون صفر، ولو كان للفوتون أي كتلة بالمرة فسيصبح ذلك مستحيلًا، ولإعادة تطبيع النظرية يتضح أنها ستصطدم باللانهائيات. ويصبح ذلك مشكلة عندما يحاول الفيزيائيون أن يستخدموا النظرية التقديرية الناجحة لتداخلات الكهرومغناطيسية كنموذج لبناء نظرية مماثلة للتداخل النووي الضعيف، وهي العملية المسئولة، بين أمور أخرى، عن التفكك الإشعاعي وانبعاث جسيمات بيتا (الإلكترونات) من الأنوية المشعة، وتمامًا مثل القوى الكهربية، فإنها تُحمل أو تتخذ وسيطًا من الفوتونات، وعليه يبدو أن القوى الضعيفة لا بد أن تنتقل بواسطة البوزون الخاص بها، لكن الوضع أكثر تعقيدًا، لأنه لكي تنتقل الشحنة الكهربية أثناء التداخلات الضعيفة، فإن البوزون الضعيف (فوتون المجال الضعيف) لا بد أن يحمل شحنة، ولذا لا بد أن يوجد فعليًّا زوج من هذه الجسيمات على الأقل، وهي بوزونات تدعى W^+ وW^-، وحيث إن التداخلات الضعيفة لا تتضمن دائمًا انتقال شحنة فعلى المنظرين أن يقحموا وسيطًا ثالثًا، وهو البوزون المتعادل Z، ليكمل مجموعة الفوتونات الضعيفة، وتتطلب النظرية وجود هذه الجسيمة التي سببت خجلًا للفيزيائيين في البداية، الذين لم يكن لديهم براهين تجريبية على وجودها.

وأول من قام بعمل حول التماثلات الرياضية الصحيحة التي تتضمن التداخل الضعيف والجسيمتين W* والجسيمة المتعادلة Z كان هو شيلدون جلاشو Sheldon Glashow من جامعة هارفارد سنة ١٩٦٠، التي نشرت سنة ١٩٦١، ولم تكن النظرية مكتملة، لكنها قدمت بصيصًا من إمكانية ظهور نظرية فيما بعد تدمج كلًّا من التداخلات الضعيفة والكهرومغناطيسية. والمشكلة الرئيسية أن النظرية قد تطلبت وجود جسيمات W، وعلى عكس الفوتونات فهي لم تكن مطلوبة لحمل الشحنة فقط، ولكن

* يمكن بالطبع اعتبار كل من W^+ وW^- كجسيمة وجسيمة مضادة، مثل الإلكترون (e^-) والبوزيترون (e^+). وإذا لم تكن مرتبكًا بما يكفي فإن W لها كذلك اسم آخر، متجه البوزون الوسيط.

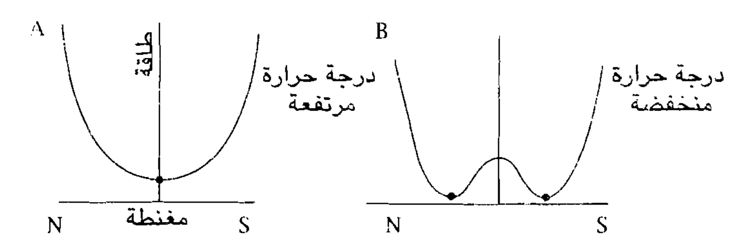
لكتلتها، الأمر الذي يجعل إعادة تطبيع النظرية أمرًا مستحيلًا ويحطم التشابه مع الكهرومغناطيسية، حيث الفوتونات بلا كتلة، ولا بد أن يكون لها كتلة، لأن التداخلات الضعيفة قصيرة المدى فقط — فإذا كانت بلا كتلة فإن مداها حينئذ سيكون بلانهاية — مثل مدى تداخلات الكهرومغناطيسية. والمشكلة ليست مع الكتلة نفسها بشكل كبير، لكنها مع الحركة المغزلية (سبين) للجسيمات، وكل الجسيمات، مثل الفوتونات، مسموح لها فقط بامتلاك سبين (حركتها المغزلية) مواز أو في الاتجاه المضاد ولاتجاه حركتها كما تقضي قواعد الكم. وجسيمة لها كتلة مثل W، من الممكن أن يكون لها أيضًا حركتها المغزلية العمودية على حركتها، وهذه الحركة المغزلية الزائدة تتسبب في كل المشاكل. أما إذا كانت جسيمات W عديمة الكتلة فسيكون عندئذ نوع من التماثل بين الفوتونات وهذه الجسيمات W وعندئذ بين التداخلات الضعيفة والتداخلات الكهرومغناطيسية، التي يمكن أن تجعل الأمر محتملًا لربطهم في نظرية واحدة قابلة لإعادة التطبيع تُفسر كلًّا من القوتين، وبسبب انكسار هذا التماثل تنشأ المشكلة.

كيف ينكسر التماثل الرياضي؟ يأتي أفضل مثال من المغناطيسية؛ فمن الممكن أن نتخيل قضيبًا من مادة مغناطيسية تحتوي على عدد هائل من مغناطيسات داخلية دقيقة، تقابل ذرات منفردة، وعندما تكون المادة المغناطيسية ساخنة، فإن هذه المغناطيسات الداخلية الدقيقة تتحرك مغزليًّا وتزاحم بعضها بعضًا عشوائيًّا وتشير إلى جميع الاتجاهات، وليس هناك مجال مغناطيسي كلي للقضيب، ولا يوجد تماثل مغناطيسي، لكن عندما يبرد القضيب تحت درجة حرارة معينة، تسمى درجة حرارة كوري، يتخذ فجأة حالة ممغنطة، بها كل المغناطيسات الداخلية الدقيقة مصطفة بعضها مع بعض، وعند درجة حرارة مرتفعة فإن أدنى حالة طاقة متاحة تقابل مغنطة هي صفر، وعند درجات الحرارة المنخفضة فإن أدنى حالة طاقة تكون مصاحبة للمغناطيسات الداخلية الدقيقة (ولا يهم الطريقة التي تصطف بها)، وقد انكسر التماثل، وحدث التغير لأنه عند درجات الحرارة المرتفعة تتغلب الطاقة الحرارية للذرات على القوى المغناطيسية، وتتغلب

القوى المغناطيسية على الحركة الحرارية للذرات عند درجات الحرارة المنخفضة.

وفي أواخر ستينيات القرن العشرين كان عبد السلام يعمل في الكلية الإمبريالية بلندن، وكان ستيفن واينبرج في هارفارد، وقد توصل كل منهما على حدة إلى نموذج للتداخل الضعيف الذي تطور من التماثل الرياضي، الذي ابتكره جلاشو في بداية الستينيات من القرن العشرين، وكذلك عبد السلام منفردًا بعد بضع سنوات. تطلب كسر التماثل في النظرية الجديدة مجالًا جديدًا، هو مجال هيجز (Higgs)، والجسيمات المصاحبة له التي سميت كذلك هيجز، وقد دُمِجَت الكهرومغناطيسية والتداخل الضعيف في مجال قياسي متماثل واحد، هو التداخل الكهربي الضعيف، بواسطة البوزونات عديمة الكتلة الوسيطة. وقد اتضح فيما بعد أن هذه النظرية قابلة لإعادة التطبيع، نتيجة أبحاث الفيزيائي الهولندي جيرالد تهوفت (Gerard t' Hooft) سنة ١٩٧١، وعند هذه اللحظة بدأ الناس يأخذون النظرية على محمل الجد. وبظهور دليل على وجود جسيمة Z سنة ١٩٧٣ أصبحت النظرية الكهربية الضعيفة مستقرة بشكل حاسم. و«يعمل» التداخل المدمج تحت ظروف طاقة عالية الكثافة فقط، مثل تلك الموجودة في الانفجار الكبير، وعند طاقات أقل تتحطم بالطريقة التي تظهر فيها جسيمات W وجسيمات Z كثيفة الكتلة، وتنفصل كل من التداخلات الكهرومغناطيسية والتداخلات الضعيفة كل في طريقه.

ومن الممكن تقييم هذه النظرية الجديدة من حقيقة أن جلاشو وسلام وواينبرج قد اقتسموا جائزة نوبل في الفيزياء عنها سنة ١٩٧٩، مع أنه لم يكن هناك برهان تجريبي مباشر على صحة فكرتهم، إلا أنه ومبكرًا سنة ١٩٨٣ أعلن فريق سيرن (CERN) في جنيف نتائج تجارب الجسيمات عند طاقة عالية جدًّا (جرى التوصل إليها بتصادم شعاع بروتونات عالية الطاقة مباشرة بشعاع من البروتونات المضادة عالية الطاقة)، ويأتي أفضل الطرق لتفسيرها بمدلول جسيمات W وZ ذات الكتلة حوالي ٨٠ جيجا إلكترون فولت (مليون إلكترون فولت) و٩٠ جيجا إلكترون فولت على

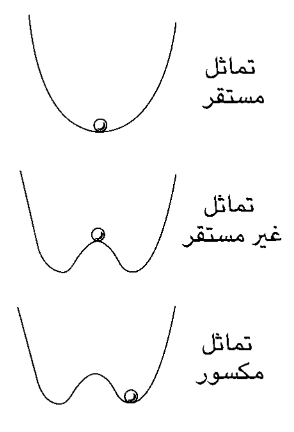


شكل خ-٥: يحدث كسر التماثل عندما يبرد قضيب من مادة مغناطيسية.

التوالى، وتتطابق النتائج مع تنبؤات النظرية بطريقة جيدة جدًّا، ونظرية جلاشو — سلام — وينبرج نظرية «جيدة» لأنها تقدم تنبؤات يمكن اختبارها، على خلاف نظرية جلاشو السابقة التي لا يمكن اختبارها. وفي الوقت نفسه لم يكن النظريون خاملين؛ فإذا أمكن دمج التداخلين في نظرية واحدة، فلماذا لا يمكن أن نجد نظرية عظمى موحدة تشمل كل التداخلات الأساسية؟ إن حلم أينشتاين أقرب كثيرًا من أن يتحقق أكثر مما نتصور، بالشكل الذي لا يحتوي فقط على التماثل، بل التماثل الفائق والجاذبية الفائقة.

الجاذبية الفائقة

والمشكلة مع نظريات القياس، بجانب صعوبة إعادة تطبيعها، أنها ليست متفردة، وتمامًا وحيث نظرية قياس واحدة تحتوي لانهائيات لا بد من تكييفها لتلائم الواقعية عن طريق إعادة التطبيع، وعليه فهناك عدد لانهائي من نظريات قياس محتملة، والنظريات التي اختيرت لتصف تداخلات الفيزياء لا بد أن تتكيف بالطريقة نفسها، على أساس الفرض نفسه، لتلائم مشاهدات العالم الواقعي. وما هو أسوأ من ذلك، لا يوجد شيء في نظريات القياس يقول ما هو عدد الأنواع المختلفة من الجسيمات التي يجب أن تكون؛ فكم عدد الباريونات أو اللبتونات (جسيمات من عائلة الإلكترونات نفسها)، أو بوزونات مقاسة، أو أي شيء آخر. ومثاليًّا يود الفيزيائيون أن يتوصلوا إلى نظرية متفردة تتطلب عددًا معينًا من أنواع معينة من



شكل خ-٦: كسر التماثل المغناطيسي من شكل خ-٥. يمكن فهمه بمدلول كسره في وادٍ، وفي حالة وجود واد واحد، فالكرة مستقرة، وهناك حالة تماثل مستقرة. أما إذا كان هناك واديان، فإن موقع التماثل غير مستقر ولا بد للكرة عاجلًا قبل آجلٍ أن تسقط في أحد الواديين محطمة التماثل.

الجسيمات فقط لتفسير العالم الفيزيائي، وقد جاءت خطوة في اتجاه مثل هذه النظرية سنة ١٩٧٤ مع ابتكار التماثل الفائق.

جاءت الفكرة من أعمال جوليوس ويس (Julius Wess) من جامعة كارل سرو، وبرونو زمينو (Bruno Zumino) من جامعة كاليفورنيا-بيركلي، وقد بدأ الاثنان بتخمين ما يجب أن تكون عليه الأمور في عالم مثالي التماثل، وكل فيرميون يجب أن يكون له بوزون مقابل له الكتلة نفسها. ونحن في الواقع لا نرى هذا النوع من التماثل في الطبيعة، ولكن التفسير يمكن أن يكون أن التماثل قد انكسر مثل التماثل الذي يتضمن الكهرومغناطيسية والتداخلات الضعيفة. ومن المؤكد بما فيه الكفاية أنك إذا أجريت العمليات الرياضية، فستجد طرقًا تصف التماثلات الفائقة التي وُجدت أثناء الانفجار الكبير، لكنها حينئذ تنكسر بالطريقة التي تكتسب فيها الجسيمات اليومية في الفيزياء كتلة صغيرة في حين شركاؤها الفائقات لها كتلة كبيرة جدًّا، ويمكن للجسيمات الفائقة حينئذ أن توجد لزمن قصير مثل انكسارها إلى

فيض من جسيمات ذات كتلة أقل، ولتخليَق هذه الجسيمات الفائقة اليوم فإنك تحتاج لتخليق ظروف مثل تلك التي سادت الانفجار الكبير، وهي من المؤكد طاقة هائلة، ولن يكون أمرًا مستغربًا حتى إذا فشل معمل سيرن (CERN) في إنتاج ذلك من تصادم أشعة بروتون/بروتون مضاد.

وكل ذلك به العديد من «إذا»، ولكن هناك نقطة أمل عظيمة، فمازال هناك أنواع مختلفة من نظريات مجالات التماثل تعني أن كل نسخة من النظرية تسمح بوجود عدد محدود من أنواع الجسيمات المختلفة فقط، وتحتوي بعض النسخ على مئات من الجسيمات الأساسية المختلفة، وهو أمر محزن، لكن هناك أخرى تمتلك متسعًا لعدد أقل كثيرًا، ولا تتنبأ أي من النظريات باحتمالية وجود عدد لانهائي من الجسيمات «الأساسية»، والأفضل من ذلك أن الجسيمات تترتب بانتظام في مجموعات عائلية في كل نظرية للتماثل الفائق، وفي أبسط النسخ يوجد بوزون واحد فقط له سبين صفر، وسبين واحد-١/٢ مشارك؛ ونسخة أكثر تعقيدًا لها ٢ سبين — واحد بوزون، وواحد سبين-١/٢ فيرميون، وواحد فيرميون مع سبين ٣/٢، وهكذا، ولكن لم تأت بعد أحسن الأخبار؛ ففي التماثلات الفائقة ليس من الضروري دائمًا أن تشغلك إعادة التطبيع، ويتم في بعض هذه النظريات تلاشي اللانهائيات بعضها بعضًا أوتوماتيكيًّا، ليس لغرض خاص، متبعين القواعد المناسبة للرياضيات وتاركين الأعداد المحدودة والمحسومة وراءنا.

ويبدو التماثل الفائق جيدًا، لكنه ليس بعد هو الجواب النهائي؛ فمازال هناك شيء مفقود، ولا يعلم الفيزيائيون ما هو، وتلائم النظريات المختلفة السمات المختلفة للعالم الحقيقي بصورة جيدة تمامًا، ولكن لا توجد نظرية تماثل فائق وحيدة تفسر كل العالم الحقيقي، ومع ذلك فهناك نظرية تماثل فائق محددة تستحق اهتمامًا خاصًّا، وتدعى هذه النظرية $N = 8$ الجاذبية الفائقة.

وتبدأ هذه الجاذبية الفائقة بجسيمة افتراضية، تسمى جرافيتون، وهي التي تحمل مجال الجاذبية، وهناك ثمانية جسيمات أخرى بجانب الجرافيتون (graviton) (منها $N = 8$) تسمى الجرافيتينوات (gravitinos)

و٥٠ جسيمة «واقعية» مثل الكواركات والإلكترونات، و٩٨ جسيمة متضمنة في التداخلات الوسيطة (فوتونات، وجسيمات W والكثير من الجليونات (gluons)). وهذا عدد مهول من الجسيمات إلا أنه من الممكن تقديره بدقة بواسطة النظرية، وليس هناك مكان لأي جسيمات أخرى. ولكن رؤية نوع الصعوبات التي يواجهها الفيزيائيون لاختبار النظرية إذا أخذنا في اعتبارنا الجرافيتينوات، لكن لم يُتعرف على هذه الجرافيتينوات أبدًا، وهناك سببان متضادان قطريًّا حول لماذا يكون الحال كذلك. وربما تكون هذه الجرافيتينوات محيرة وجسيمات شبحية ذات كتلة ضئيلة جدًّا ولا تتداخل مع أي شيء بالمرة، أو ربما تكون كتلتها كبيرة جدًّا حتى إن أجهزة توليد الجسيمات الموجودة لدينا هذه الأيام غير مناسبة لتقدم الطاقة الضرورية لتخليقها ومشاهدتها.

والمعضلات هائلة، لكن نظريات مثل نظرية الجاذبية الفائقة على الأقل متماسكة ومحددة، وليست في حاجة إلى إعادة التطبيع، وهناك إحساس بأن الفيزيائيين على المسار الصحيح، ولكن إذا كانت معجلات الجسيمات غير مناسبة لاختبار النظرية، فكيف يمكنهم التأكد من ذلك؟ وهذا هو السبب في أن علم الكون (الكوسمولوجيا) — دراسة كل الكون — هو مجال مزدهر للعلوم هذه الأيام، وكما قال هاينز باجليز (Heinz Pagels) المدير العام لأكاديمية العلوم بنيويورك سنة ١٩٨٣: «لقد دخلنا بالفعل عصر فيزياء ما بعد المعجلات، الذي بسببه يصبح كل تاريخ الكون أرضية للبرهنة على الفيزياء الحديثة.»* وليس علماء الكون أقل حماسًا لاحتضان فيزياء الجسيمات.

هل الكون تموجات فراغية

قد يكون علم الكون في الواقع فرعًا من فيزياء الجسيمات، لأنه وفقًا لأحد الأفكار التي ازدهرت خلال العشر سنوات الماضية أو حول ذلك، حيث

* مقتبسة من «ساينس»، ٢٩ أبريل ١٩٨٣، المجلد ٢٢٠، صفحة ٤٩١.

نظر إليها على أنها فكرة مجنونة تقترب من كونها محل تقدير، وتعتبر مجرد فكرة خيالية، فربما يكون الكون وكل شيء فيه، ليس أكثر ولا أقل من واحد من تلك التموجات الفراغية التي تسمح لتجمعات الجسيمات أن تندفع بشدة من لا شيء، وتعيش لفترة ثم يعاد امتصاصها ثانية داخل الفراغ. وترتبط هذه الفكرة بشكل كبير مع احتمال أن يكون الكون مغلقًا جاذبيًّا؛ فالكون الذي يولد في كرة النار في الانفجار الكبير، ويتمدد لفترة من الزمن ثم يتقلص مرة أخرى ويختفي، ماهو إلا تموجات فراغية، ولكن بمقياس ضخم جدًّا، وإذا كان الكون متوازنًا تمامًا على حافة الجاذبية بين التمدد اللامحدود والانهيار المحتوم، حينئذ لا بد لطاقة الجاذبية السالبة للكون أن تلاشي بالضبط كتلة الطاقة الموجبة لكل المادة الموجودة فيه، والطاقة الكلية للكون المغلق هي صفر، وليس من الصعوبة أن تصنع شيئًا ما له طاقة كلية مساوية للصفر من تموجات فراغية، حتى لو كان الأمر خدعة محبوكة بأن نجعل كل الأجزاء الصغيرة تتمدد مبتعدة بعضها عن بعض وتسمح بوجود كل الأنواع المختلفة المثيرة التي نراها مؤقتًا.

وأنا مولع بصفة خاصة بهذه الفكرة لأنني لعبت دورًا في ظهورها بشكلها الحديث في سبعينيات القرن العشرين، ويمكن اقتفاء أثر الفكرة الأصلية حتى لودفيج بولتزمان وهو فيزيائي من القرن التاسع عشر، وأحد مؤسسي الديناميكا الحرارية الحديثة والميكانيكا الإحصائية؛ افترض بولتزمان أن الكون لا بد أن يكون في حالة اتزان ديناميكي، لكنه ظاهريًّا ليس كذلك، ومظهره الحالي قد يكون نتيجة حيود مؤقت للاتزان الذي تسمح به قواعد الإحصاء، شريطة الاحتفاظ بالاتزان، في المتوسط، على المدى الطويل. وفرصة حدوث مثل تلك التموجات بمقياس الكون المرئي ضئيلة، لكن إذا وجد الكون في حالة استقرار لزمن لانهائي، حينئذ سيكون ذلك تأكيدًا فعليًّا لشيء ما من النوع الذي يحدث في النهاية، وحيث إن الحيود عن الاتزان هو الذي يسمح فقط للحياة أن توجد، فإنه ليس من الغريب أننا يجب أن نكون هنا أثناء الابتعاد النادر للكون عن الاتزان.

لم تلق أفكار بولتزمان أبدًا قبولًا، لكن واصلت بعض تنويعات على الموضوع ظهورها من حين لآخر، وسنة ١٩٧١ لفتت تلك التنويعات انتباهي، وكتبت عنها في مجلة نيتشر، وكانت هي احتمال أن الكون لأنه مولود في النار فإنه يتمدد ثم يعود للانهيار إلى لا شيء* وبعد ذلك بسنتين قدم إدوارد ترايون Edward Tryon، من جامعة المدينة بنيويورك، بحثًا إلى مجلة نيتشر مطوِّرًا فكرة الانفجار الكبير كتموجات فراغية، ولكنه أشار في الخطاب المرفق بالبحث إلى مقالي غير الموقع على أنه نقطة البداية لافتراضاته.† وهكذا فإن لي اهتمامًا خاصًّا بهذا النموذج الكوني بالذات، مع أنه طبعًا أمر سليم أن يعود الفضل كاملًا إلى ترايون الآن في التوصل إلى الفكرة الحديثة عن الكون على أنه توجات فراغية، فلم يفكر فيها أحد من قبل، ولكن كما أشار إلى الزمان في حالة إذا للكون محصلة طاقة مساوية للصفر، فحينئذ يكون الزمن المسموح به لوجوده، يتمشى مع:

$$\Delta E \Delta t = \hbar$$

ويمكن أن يكون طويلًا جدًّا بالتأكيد، وقال: «إني لا أزعم أن الأكوان مثل كوننا تحدث كثيرًا، وخلاصة القول فإن التواتر المتوقع لحدوث ذلك ليس صفرًا، وعلى كل فإن منطق الظروف يفرض على المشاهدين أن يجدوا أنفسهم دائمًا في أكوان وقادرين على بعث الحياة، ومثل هذه الأكوان كبيرة بدرجة مثيرة للإعجاب.»

ظلت هذه الفكرة مهملة لعشر سنوات، ولكن الناس بدءوا أخيرًا ينظرون إلى نسخة جديدة منها بجدية، ومع أن آمال ترايون الأولية، فإن الحسابات المقترحة على أن أي «كون كمي» جديد يتكون كتموجات فراغية هو في الواقع ظاهرة دقيقة، وقصيرة العمر، وتشغل حجمًا صغيرًا فقط في الزمكان. ولكن اكتشف علماء الكون بعد ذلك طريقة لجعل هذا الكون المتناهي الصغر يزدهر إلى تمدد دراماتيكي يجعله ينمو إلى حجم الكون

* مجلة نيتشر، المجلد ٢٣٢ صفحة ٤٤٠ سنه ١٩٧١.
† مجلة نيتشر، المجلد ٢٤٦ صفحة ٣٩٦ سنه ١٩٧٣.

الذي نعيش فيه في طرفة عين، «والتضخم» هو الكلمة السحرية في علم الكون في منتصف ثمانينيات القرن العشرين، ويفسر التضخم كيف أن تموجات فراغية متناهية الصغر يمكن أن تنمو إلى الكون الذي نعيش فيه.

التضخم والكون

كان علماء الكون مهتمين بالفعل بأي جسيمات زائدة قد تكون موجودة في الكون، لأنهم دائمًا يبحثون عن «الكتلة المفقودة» المطلوبة التي تكوِّن الكون المغلق، وقد تكون الجرافيتينوات ذات كتلة نحو ١٠٠٠ إلكترون فولت للجسيمة مفيدة بصفة خاصة، ليس لأنها ستساعدنا في غلق الكون فقط، لكن وفقًا للمعادلات التي تصف تمدد الكون من الانفجار الكبير، فإن وجود مثل هذه الجسيمات قد يكون الشيء الصحيح ليشكل تجمعات للمادة في حجم المجرات. وقد تكون النيوترينوات ذات الكتلة ١٠ إلكترون فولت مناسبة فقط لتشجيع نمو تجمعات المادة إلى تجمعات أضخم من المجرات، وهكذا، ولكن خلال السنتين الماضيتين أصبح علماء الكون أكثر اهتمامًا بفيزياء الجسيمات، لأن آخر تفسيرات كسر التماثل تقترح أن التماثل المكسور نفسه قد يكون هو القوة الدافعة التي فجرت فقاعة من الزمكان إلى حالته المتمددة.

جاءت الفكرة أصلًا من آلان جوث Alan Guth من معهد ماسيتشوستس MIT، وترجع الفكرة للوراء لصورة طور الكون الساخن جدًّا والكثيف جدًّا الذي فيه كل تداخلات الفيزياء — ماعدا الجاذبية، النظرية التي لم تتضمن بعد التماثل الفائق — تتحد في تداخل تماثلي واحد، وعندما بدأ الكون يبرد وينكسر التماثل، والقوى الأساسية للطبيعة — الكهرومغناطيسية والقوى النووية القوية والضعيفة — ذهبت كل منها في مسارها المنفصل. ومن الواضح أن حالتي الكون قبل وبعد كسر التماثل تختلفان جذريًّا إحداهما عن الأخرى. والتغير من حالة إلى أخرى نوع من تغير طوري مثل تغير الماء إلى الثلج عندما يتجمد، أو إلى بخار عندما يغلي، وليس مثل تغير الأطوار

اليومي، ومع ذلك، فإن كسر التماثل الذي حدث في الكون المبكر يجب، وفقًا للنظرية، أن يولد تنافرًا كبيرًا طاغيًا لقوى الجاذبية، مفجِّرًا كل شيء في جزء من الثانية.

ونحن نتكلم عن الأصول المبكرة جدًّا للكون، أي قبل $١٠^{-٣٥}$ ثانية تقريبًا، عندما كانت «درجة الحرارة» ربما أكثر من $١٠^{٢٨}$ درجة كلفين، بما يعنى أن درجة الحرارة ليس لها معنى في مثل هذه الحالة، وقد يكون التمدد الناتج من كسر التماثل أُسِّيًّا، ومضاعفًا لكل حجم دقيق جدًّا كل $١٠^{-٣٥}$ ثانية. وفي غضون زمن أقل كثيرًا من الثانية، قد يضخم هذا التمدد الخطير منطقة في حجم البروتون إلى حجم الكون الذي نشاهده اليوم، وحينئذ وفي منطقة تمدد الزمكان، فإن فقاعات مما نعتقد نحن أنه زمكان عادي تتطور وتنمو عن طريق تحول طوري أبعد.

ولم تحاول نسخة جوث الأولية للكون التضخمي أن تفسر من أين أتت الفقاعات الأولية الدقيقة، ولكنه أمر مغرٍ جدًّا أن تساوي بين ذلك وبين التموجات الفراغية من النوع الذي وصفة ترايون.

وتحل هذه الرؤية الدراماتيكية للكون الكثير من الألغاز الكونية، وليس أقلها المصادفة الجديرة بالملاحظة عن أن فقاعتنا للزمكان يبدو أنها تتمدد بمعدل على الحدود بين أن يظل مفتوحًا أو مغلقًا بالكاد، ويتطلب سيناريو الكون التضخمي أنه يجب الأخذ بهذا التوازن، بسبب العلاقة بين كثافة الكتلة/الطاقة للفقاعة وبين القوى التضخمية. والأمر الأكثر إثارة هو أن هذا السيناريو يسلمنا إلى دور تافه جدًّا في الكون، واضعًا كل ما نراه في فقاعة داخل فقاعة أخرى لِكُلّ متمدد أكثر كثيرًا.

ونحن نعيش في زمن مثير، وفيما يبدو فإننا على حافة فتح كبير لفهمنا عن الكون به من الأهمية كما تنبأ ديراك، مثل الخطوة التي حدثت من ذرة بور إلى ميكانيكا الكم، وإنني أجد الأمر مثيرًا بصفة خاصة، حيث انتهى بحثي عن قطة شرودنجر بالانفجار الكبير، وعلم الكون، والجاذبية الفائقة. وقد بدأت في كتابي السابق «التواء الفضاء» في سرد قصة الجاذبية والنسبية العامة وانتهيت إلى المكان نفسه، وفي كلتا الحالتين لم يكن هذا

مخططي الأصلي؛ وفي كلتا الحالتين يبدو أن الجاذبية الفائقة هي نقطة النهاية الطبيعية، وربما هي إشارة إلى أن التوحيد بين نظرية الكم والجاذبية يلوح في الأفق، إلا أنه ليس هناك نهاية واضحة بعد، وإنني لآمل ألا يحدث هذا. وكما قال ريتشارد فينمان «أحد طرق توقف العلوم قد تكون أن تقوم بتجارب في المنطقة التي تعرف أن القانون موجود بها». والفيزياء هي البحث عن المجهول و:

> ما نحتاجه هو التخيل، ولكنه تخيل مجنون، ويجب أن نعثر على رؤية جديدة للعالم تتوافق مع كل شيء معروف، ولكن تختلف في تنبؤاتها في مكان ما، وإلا فإنها ستكون غير مثيرة، وفي هذا الاختلاف يجب أن تتفق مع الطبيعة. فإذا استطعت أن تجد أي رؤية أخرى للعالم تتفق على طول المدى، حيث شوهدت الأشياء بالفعل، ولكن تختلف في مكان ما، فإنك تكون قد توصلت إلى اكتشاف كبير، وهذا شيء مستحيل تقريبًا، لكن ليس تمامًا ...*

وإذا انتهى عمل الفيزياء تمامًا، فإن العالم سيصبح مكانًا أقل إثارة فيما يتعلق بالحياة، ولهذا فإنني سعيد لأن أتركك مع بعض النقاط دون حل، ومع تلميحات مرغوب فيها، وفرصة لقصص أكثر لم ترو بعد، كل واحدة منها مثير مثل قصة قطة شرودنجر.

---

* خاصية القانون الفيزيائي، صفحة ١٧١.



ببليوجرافيا

هذه هي الكتب التي قرأتها أثناء طريقي للبحث عن حقيقة قطة شرودنجر، ولم أعنِ أن أقدم ببليوجرافيا شاملة لنظرية الكم، وقد يلاحظ الخبراء في المجال بكل تأكيد غياب بعض العناوين التي يتوقعون وجودها هنا، إلا أن أحد المراجع قد يقودنا إلى مرجع آخر، وتستطيع أن تجد أي شيء ذا أهمية مكتوبًا عن نظرية الكم عامة، وما هو أكثر من ذلك، بأن تبدأ في مكان ما في الخيارات التالية ثم تتبع ما تريد، وبالإضافة إلى المتون الحقيقية، فإنني ضمنت كتابي في نهايته مجموعة من عناوين الخيال العلمي، التي ليست مسلية فقط بل تحتوي على معلومات مفيدة عن بعض موضوعات الكم وخاصة فكرة العوالم المتوازية.

ببيلوجرافيا

نظرية الكم

أ. دابرو، بزوغ الفيزياء الجديدة، الجزء الثاني، دوفر، نيويورك، ١٩٥١ (الطبعة الأصلية ١٩٣٩).

معالجة مبكرة شاملة لغير المتخصصين، ويغطى الجزء الأول الخلفيتين التاريخية والرياضية، وعليه فالجزء الثاني كله حول النظرية الكمية، وليست الطريقة القديمة سهلة القراءة للمستمعين حديثًا، إلا أنها معالجة متبحرة جدًّا (يشكل الجزآن معًا ٩٨٢ صفحة) وتستحق القراءة تمامًا إذا كنت قد كرست نفسك بما فيه الكفاية للعمل على فهم بعض الرياضيات.

كنيث آتكينس، الفيزياء — مرة أخرى — بخفة، وايلي، نيويورك ١٩٧٢.

هذا الكتاب موجه للطلاب غير المتخصصين في العلوم لدراسة الفيزياء على مدى فصل دراسي واحد، لكنه مشوق وواضح بما فيه الكفاية ليكون ذا قيمة للقارئ العادي، وهو أفضل أنواع المراجع المستخدمة والجادة في الفيزياء للطلاب غير المتخصصين في العلوم، وهو يطوف بالقارئ بدءًا من البدايات البسيطة إلى النسبية فميكانيكا الكم والأنوية والجسيمات. ومع أن الكتاب يمس التضمينات الفلسفية ومعنى الواقعية الكمية على استحياء فقط، فإنه يقدم الأساس لطهي الكم بوضوح لأي إنسان يود أن يضع بضعة أرقام في المعادلة، وإني أوصي به بشدة.

تيد باستين (الناشر)، نظرية الكم وما بعدها، مطبعة جامعة كمبريدج، نيويورك، ١٩٧١.

مبني على مقالات ألقيت في حلقة دراسية غير رسمية عقدت بكمبريدج سنة ١٩٦٨ لدراسة إمكانية حدوث «تحول جذري» رئيسي في نظرية الكم الذي يبدو محتملًا جدًّا، والكتاب أصعب وأكثر ميلًا للفلسفة من معظم الكتب المشار إليها هنا.

ماكس بورن، الكون القلق/دوفر، نيويورك، ١٩٥١.

أفضل تقرير معاصر في الفيزياء الجديدة كتب بواسطة أحد الشخصيات الرائدة في تطوير نظرية الكم، وهو ليس تاريخًا لميكانيكا الكم، لكنه «كتاب للعامة» حول الفيزياء يحتوي على اهتمام خاص بواحد من الأوصاف لأساس التفسير الإحصائي الذي كان السبب في حصول بورن على جائزة نوبل فيما بعد. ويحتوي أيضًا على شيء جدير بالذكر، فهو يحتوي — منذ نصف قرن — على صفحة كاريكاتورية توضح العمليات الديناميكية.

ماكس بورن، خطابات بورن-أينشتاين، مكميلان، لندن، ١٩٧١.

مراسلات جرت بين رجلين عظيمين مع تعليقات لبورن، ويحتوي على تعليقات هامشية عديدة ومثيرة حول نظرية الكم وامتناع أينشتاين عن تقبل تفسير كوبنهاجن.

لوى دى برويل، المادة والضوء، نورتون، نيويورك، ١٩٣٩ (ترجمة الطبعة الفرنسية المنشورة سنة ١٩٣٧، ومتاح كذلك في طبعة ورقية من دوفر).

كتاب ذو أهمية تاريخية أساسًا، وهو تقرير معاصر تقريبًا لميلاد الفيزياء الجديدة بواسطة أحد المساهمين فيها.

لوي دي برويل، الثورة في الفيزياء، دار نشر جرينوود، نيويورك ١٩٦٩.

نسخة إنجليزية مترجمة ترجمة ليست جيدة لكتاب فرنسي آخر أقدم كثيرًا، لكنه ذو أهمية تاريخية.

فريتجوف كابرا، طاوية الفيزياء، بانتام، نيويورك ١٩٨٠.
باكورة الموجة الجديدة للكتب التي تربط فيزياء الجسيمات الحديثة بالفلسفة الشرقية والتصوف والدين، وكابرا فيزيائي ينسج رواية compelling تحتوي على الأفكار الأساسية للكم، ولكن ليست في نهج تاريخي.

جيريمي تشيرفاز، حياة من صنع الإنسان، بلا كويل، وأكسفورد، ١٩٨٢.
مقدمة مباشرة لغرائب الهندسة الوراثية وإمكانياتها وحدودها.

باربارا لوفيت كلاين، المتسائلون، كرويل، نيويورك، ١٩٦٥.
قصة ميكانيكا الكم مروية بمدلول السيرة الذاتية؛ فصول عن رذرفورد وبلانك وأينشتاين وبور، وباولي وهايزنبرج، كتاب جيد للقراءة، وقوي في نوادره لكنه لا يحتوي إلا القليل من الفيزياء.

فرانسيس كريك، الحياة ذاتها، سيمون ج شستر، نيويورك، ١٩٨٢.
مقدمة سهلة لطبيعة الجزيئات الحية، مع افتراض أن الحياة على الأرض ربما تكون قد وصلت من العالم الخارجي ككل.

بول دافيس، الكون العرضي، دار نشر جامعة كمبريدج، نيويورك، ١٩٨٢.
تقرير واضح لكنه رياضي للعديد من «الأحداث» الكونية التي أدت إلى وجودنا هنا، ويتضمن إشارة مختصرة لمواءمة تفسير إيفرت لميكانيكا الكم مع المبدأ البشري. وللمؤلف نفسه تقرير غير رياضي مكتوب للعامة حول المبدأ البشري كموضوع رئيسى وعنوانه «عوالم أخرى» (دينت، لندن، ١٩٨٠).

باريس دى ويت، دنيل جراهام، المحررون، تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم، دار نشر جامعة برنستون، ١٩٧٣.
تجميع لنسخ من المقالات الرئيسية التي أرست أساس نظرية العوالم المتعددة، يتضمن الكتاب رسالة الدكتوراه لإيفرت ومقالات إيفرت وويلر الصادرة سنة ١٩٥٧ من مجلة عروض الفيزياء الحديثة ومحاولات دي ويت وجراهام فيما بعد لتوسيع وانتشار النظرية وكذلك مساهمات أخرى. وهو مرجع جميل من جزء واحد لكل ما دار حول هذا الموضوع.

بول ديراك، مبادئ ميكانيكا الكم، دار نشر جامعة أوكسفورد، نيويورك ١٩٨٢.

كتاب مليء بالتعريفات وهو صالح للطلاب الجادين حتى اليوم، روجع وحُدِّث عدة مرات، ويحتوي الكتاب على جزء عن الديناميكا الكهربية (الكهروديناميكية) الكمية، وتعرض أجزاء المقدمة نقاشًا صافيًا عن عدم التحديد، والتطابق، والحاجة لميكانيكا الكم كما ستجدها في أي مكان. وحتى إذا لم تكن طالبًا جادًّا، فإن الكتاب يستحق أن تستعيره من المكتبة لقراءة الفصل الأول، أما إذا كنت طالبًا جادًّا فإن مدخل ديراك من الرياضيات إلى شرودنجر وتفسيرات هايزنبرج أكثر منطقية وذكاءً عن الطريقة التي يدرس بها الموضوع عادة اليوم.

بول ديراك، اتجاهات الفيزياء، وايلى، نيويورك ولندن، ١٩٧٨.

محاضرات ألقيت في استراليا ونيوزيلندا سنة ١٩٧٥، لا تقدر بثمن كرؤية لآخر عضو على قيد الحياة من المجموعة التي طورت ميكانيكا الكم في عشرينيات القرن العشرين، وضعف ذلك من النسخ المباشرة للشرح الرائع من محاضرات ديراك الواضحة. ويحتوى الكتاب على مناقشة أفكار مثل الجاذبية المتغيرة والمغناطيسات أحادية القطب التي تلقي الضوء على عدم اكتمال الفيزياء اليوم.

سير آرثر إدنجتون، طبيعة العالم الفيزيائي، طبعة مكتبة فولكروفت، فولكروفت، بنسلفانيا، ١٩٣٥.

مرجع يحتوي سلسلة محاضرات ألقيت في أدنبرة سنة ١٩٢٧، ويعرض هذا الكتاب نظرية ثاقبة ونادرة لتأثير نظرية الكم على أحد أعظم العلماء في عشرينيات القرن العشرين، وقد كُتب فى وقت كان الموضوع مازال يتغير فيه بوتيرة سريعة. وبجانب كون إدنجتون عالمًا رائدًا فإنه كان كذلك من أوائل وأفضل من نشروا العلم للعامة.

سير آرثر إدنجتون، العلم والعالم غير المرئي، طبعة مكتبية فولكروفت، فولكروفت، بنسلفانيا ١٩٧٩.

مزيد من مادة المحاضرة من الفترة نفسها.

سير آرثر إدنجتون، المسارات الجديدة في العلم، دار نشر جامعة كمبريدج، ١٩٣٥.

سلسلة من المحاضرات ألقيت بجامعة كورنيل سنة ١٩٣٤. يبين كيف تقدمت الأمور منذ ظهور كتاب طبيعة العالم الفيزيائي.

سير آرثر إدنجتون، فلسفة العلوم الفيزيائية، دار نشر جامعة ميتشجان، آن آربر، ١٩٥٨ (الطبعة الأصلية صدرت عن دار نشر جامعة كمبريدج ١٩٣٨).

المزيد من المحاضرات التي بدأت في نهاية ثلاثينيات القرن العشرين ولها ميل أكثر للفلسفة كما يدل عنوانها.

ليونارد آيزبناد، الأسس المفهومية لميكانيكا الكم، فان نوستراند راينهولد، نيويورك، ١٩٧١.

يستخدم الحد الأدنى من الرياضيات ويركز على المغزى الفيزيائي لنظرية الكم، لكن كلمة «الحد الأدنى» هنا ما زالت تعني الكثير، وهو دليل جيد لا يتعمق في شرح البنية الذرية وغيرها، لكنة يقدم رؤية فيزيائية وفلسفية ثاقبة لألغاز عالم الكم.

ريتشارد فينمان، ميزة القانون الفيزيائي، دار نشر MIT، كمبريدج، ١٩٦٧.

سلسلة من المحاضرات التليفزيونية ألقيت في جامعة كورنيل سنة ١٩٦٤ وأذيعت من BBC2 سنة ١٩٦٥، وكلها سهلة القراءة من محاضر أستاذ متمكن وتتضمن فصلًا جيدًا عن رواية ميكانيكا الكم للطبيعة.

ريتشارد فينمان، وروبرت ليتون، وماثيوساندز، محاضرات فينمان في الفيزياء، الجزء الثالث، أديسون ديسلي، ريدنج، ماسيتشوسيتس، ١٩٨١.

أكثر الكتب سهولة في الوصول إليها كمقدمة في ميكانيكا الكم للطلاب الجادين، وهو كتاب جيد جدًّا فيما يتعلق بتجربة الشقين الطوليين الشهيرة ويحتوي على مناقشة مثيرة حول التوصيل الفائق.

جورج جامو، الذرة ونواتها، برينتس هول، نيوجرسى، ١٩٦١.
كتاب سهل القراءة وبه كمية لابأس بها عن الكوانتا ونظرية الموجات من أستاذ متمكن في سرد القصة، الذي صادف أنه كان جزءًا من هذه القصة، وقد عمل جامو لفترة مع بور. وهو مكتوب بطريقة عتيقة لكنه مسل ويستحق الدراسة ولو لمجرد اسكتشاف الشخصيات الرئيسية.

موريس جولد سميث، وآلان ماكاي، وجيمس وودهايسن، المحررون، أينشتاين: المائة عام الأولى، برجامون، إيلمسفورد، نيويورك ١٩٨٠.
كتاب patchy يحتوي على مقال رائع عن أينشتاين بقلم س. ب. سنو.

جون جريبين وجيرمى تشيرفاز، أحجية القرد، بودلي هيد، لندن وبانثيون ونيويورك، ١٩٨٢.
كتاب حول تطور الإنسان ويتضمن تقريرًا شاملًا غير تقني عن أبحاث الدنا DNA.

نيلز هيثكوت، الحاصلون على جائزة نوبل في الفيزياء من ١٩٠١–١٩٥٠، هنري شومان وآخرون، ١٩٥٣ (أعيد طبعة سنة ١٩٧١ بواسطة كتب لدار نشر المكتبات، نربيورت، نيويورك).
به إسكتشات عن سيرة حياة مختصرة وموجز للأعمال التي منحت لأجلها الجائزة، ويشير هذا المجلد بأناقة إلى الدور الطاغي لنظرية الكم في فيزياء النصف الأول من القرن العشرين. ولا يغيب سوى اثنين من الأسماء الرئيسية — ماكس بورن الذي لم يحصل على جائزته إلا في خمسينيات القرن العشرين، وإرنست رذرفورد الذي منح الجائزة في مجال «الكيمياء» — والكتاب يستحق أن تغوص فيه.

فيرنر هايزنبرج، الفيزياء والفلسفة، هاربرورو ١٩٥٩.
كتاب به سلسلة من المحاضرات التي ألقيت في جامعة سانت أندروز عامي ١٩٥٥–١٩٥٦. ويحتوي على تاريخ مختصر لنظرية الكم وعلى مناقشة لتفسير كوبنهاجن من أحد مؤسسي ميكانيكا الكم، ولا يوجد بالكتاب رياضيات على الإطلاق.

فيرنر هايزنبرج، الإدراك الفيزيائي للطبيعة، دار نشر جرينوود، ويستبورت، كوننيكات، ١٩٧٠ (طبعة هاركوت بريس منشورة سنة ١٩٥٨).

مجلد آخر شبه فلسفي، ويستحق الذكر هنا بصفة خاصة للتأكيد على عدم خلطه بكتاب جاكديش ميهرا الذي يحمل نفس الاسم! (انظر فيما بعد).

فيرنر هايزنبرج، الفيزياء وما بعدها، هاربرورو، نيويورك، وآلين وآنرين، لندن ١٩٧١.

يحمل الكتاب العنوان الفرعي «ذكريات حياة في العلم» وهو سيرة ذاتية شخصية بها نوادر وقليل من العلم، لكن به الكثير من الرؤية الثاقبة عن هايزنبرج الإنسان.

بانيش هوفمان، قصة الكم الغريبة، بيتر سميث ماجنوليا، ماسيتشوسيتس، ١٩٦٣ (نشرت الطبعة الأصلية سنة ١٩٤٧).

رؤية شيقة لنظرية الكم التي لا تزال جديدة نسبيًّا من منظور أربعينيات القرن العشرين، وفي بعض الأحيان يقع المؤلف في مصيدة التبسيط الزائد، مما يفقده خيوط دوافعه في محاولته الالتزام باللغة اليومية، إلا أنه لا يزال جيدًا للقراءة حتى بعد ما يقرب من أربعين سنة منذ كتابته، والكتاب يستحق البحث عنه حتى ولو بمجرد الملحوظة المكتوبة سنة ١٩٥٩، التي تصف بصفاء التطورات التي وقعت في العقد السابق ومتضمنة لأشكال فينمان وفقد السببية.

إرنست إيكنبرى، ميكانيكا الكم، دار نشر جامعة أوكسفورد، لندن، ١٩٦٢.

كتاب للرياضيين والفيزيائيين، وهو ليس مرشدًا لمن هم خارج التخصص. وهو قوي فيما يتعلق بـ«كيفية» استخدام نظرية الكم لحل المشاكل، لكنه ضعيف في تفسير ما تعنيه المعادلات.

ماكس جامر، التطور المفهومي لميكانيكا الكم، ماك جروهيل، نيويورك، ١٩٦٦.

دراسة شاملة في مجلد واحد، وليس به من الرياضة ما يصدم، لكن يمكنك الحصول على الكثير من الرؤية الثاقبة المشوقة حتى لو أسقطت معظم الرياضيات.

ماكس جامر، فلسفة ميكانيكا الكم، وايلي، نيويورك ولندن، ١٩٧٤.

كتاب عن تفسير ميكانيكا الكم ومغزاها الفلسفي، ويحتوي في بعض الأحيان على تفاصيل مسهبة حول تاريخ تفسير كوبنهاجن مثلًا، ولكنه يذهب أبعد من وصفات طهي الكم.

باسكوال جوردان، فيزياء القرن العشرين، المكتبة الفلسفية، نيويورك، ١٩٤٤.

وهذا الكتاب أساسًا ذو اهتمام تاريخي مثل كتب دي برويل المشار إليها مسبقًا، وقد كتب كتقرير بواسطة أحد رواد اختراعات الفيزياء في القرن العشرين.

هو راس جادسون، اليوم الثامن للخلق، سيمون وشوستر، ١٩٨٢.

كتاب ضخم غير متماسك إلى حد ما عن التطور الثوري للبيولوجيا الجزيئية خلال النصف الثاني من القرن العشرين، الذي يستحق القراءة بذاته، وذلك لوجود قصة البيولوجيا الجزيئية والنظرة الثاقبة للكيفية التي يعمل بها العلماء، ومواءمته الخاصة مع قصة ثورة الكم هي السبيل الواضح الذي أكد به جادسون أن ميلاد ما نسميه البيولوجيا الجزيئية قد حدث عندما استخدم لاينس بولنج قواعد ميكانيكا الكم ليتوصل إلى فهم كيمياء الجزيئات المعقدة، ولسوء الحظ، فإن جادسون يقول أيضًا وهو على خطأ، إن نسخ هايزنبرج وبورن وديراك لميكانيكا الكم قد ظهرت بعد شرودنجر. لكن لا أحد كاملًا.

جاجديش ميهرا (المحرر)، مفهوم الفيزيائيين عن الطبيعة، كلور، وبوسطن، ١٩٧٣.

أعمال مؤتمر عقد في تريستا سنة ١٩٧٢ على شرف عيد الميلاد السبعيني لبول ديراك، والقائمة الهائلة للمشاركين من أمثال كل من أسهم في نظرية الكم تجعل من هذه الملحمة التي تحتوي على ٨٣٩ صفحة

في مجلد واحد، واحدًا من أفضل العلامات، للمتبحرين في العلوم، على طريق تحول الفيزياء في القرن العشرين.

جاجديش ميهرا، وهلموت ريتشنبرج، التطور التاريخي لنظرية الكم، سبرنجر-فيرلاج، نيويورك، ١٩٨٢.

تغطي هذه الدراسة التاريخية القطعية للفيزياء الكمية، وقد نشر أربعة مجلدات، القصة حتى سنة ١٩٢٦، ومن المخطط له إصدار خمسة مجلدات لتستكمل الدراسة حتى اليوم. ومع أن هذا العمل الهائل لا يفرض أي صدمات رياضية، إلا أن العديد من المعادلات به محاطة بثروة من المعلومات الجديرة جدًّا بالقراءة.

أبراهام بيي، رقيق هو الرب ....، دار نشر جامعة أوكسفورد، لندن ونيويورك، سنة ١٩٨٢.

تقرير قطعي لحياة وأعمال أينشتاين.

هابنز بيجلس، شفرة الكون، سيمون وشوستى، نيويورك، ١٩٨٢.

محاولة شجاعة لشرح النظرية النسبية ونظرية الكم، وفيزياء الجسيمات الحديثة في مجلد واحد. ولب هذا الكتاب المكتوب بواسطة أحد فيزيائي الجسيمات، هو تقرير تفصيلي «لحديقة حيوان» الجسيمات؛ الكواركات والجليونات، وكل البقية. وتعرض نظرية الكم هنا بطريقة أكثر إيجازًا، كالخلفية الضرورية لفهم الجسيمات في حديقة الحيوانات تلك، بدون منظور تاريخي، وهو مكان جيد إذا أردت معرفة المزيد عن انتشار الجسيمات، ويعرض الكتاب كذلك مقارنة شيقة مع أعمال كابرا وزوكاف.

جاى م. باساتشوف، ومارك ل. كوتنر، دعوة للفيزياء، و. و. نورتون، نيويورك ولندن، ١٩٨١.

ومع أن هذا الكتاب ظاهريًّا لغير المتخصصين في العلوم، فإنه يقدم نظرة عامة مقبولة لكل الفيزياء مع قليل من الرياضيات، ومن الممكن أن نوصي به لأي شخص له اهتمام بالعلوم الحديثة بكل أمان.

ماكس بلانك، فلسفة الفيزياء، و. و. نورتون، نيويورك ١٩٦٣ (الطبعة الأصلية ١٩٣٦).

والكتاب له اهتمام تاريخي فقط، ولكنه نظرة ثاقبة في فكر الإنسان — الذي بدون تقدير الخطوة الهائلة التي اتخذها في الأصل — قد أرسى أسس نظرية الكم للإشعاع.

إرفين شرودنجر، مجموعة مقالات حول الميكانيكا الموجية، شركة نشر تشيلسيا، نيويورك، ١٩٧٨ (مترجمة عن الطبعة الألمانية المنشورة سنة ١٩٢٨).

المقالات الأساسية التي وضع فيها شرودنجر أسس الميكانيكا الموجية، متضمنة تحليله الذي استعرض فيه تكافؤ المصفوفة والميكانيكا الموجية، والمقالات الأساسية الأصلية حول ميكانيكا المصفوفات التي جمعها بواسطة فان درفيرون (انظر فيما بعد).

إرفين شرودنجر، ما الحياة؟، دار نشر جامعة كمبريدج، نيويورك، ١٩٦٧ (الطبعة الأصلية ١٩٤٤؛ وقد ضمت هذه الطبعة في مجلد واحد مع «العقل والمادة» والمنشور أصلًا سنة ١٩٥٨).

كتاب مكتوب بطريقة جميلة ويهتم بالتاريخ كمؤثر رئيسي على الناس الذين أزالوا الغموض عن بنية الجزيئات الحية، ولا يزال يستحق القراءة مع أنه من المعروف أن جزيئات الحياة هي دنا DNA، وأن الجينات ليست مصنوعة من البروتينات كما افترض ذلك شرودنجر عندما كتب هذا الكتاب. وإذا لم يقنعك هذا الكتاب بأن لنظرية الكم أهمية محورية في الهندسة الوراثية، فلن يقنعك شيء آخر.

إرفين شرودنجر، العلم والنظرية والإنسان، منشورات دوفر/آلن وآنوين، لندن، ١٩٥٧ (الطبعة الأصلية سنة ١٩٣٥).

يحتوي على خطاب شرودنجر عندما منح جائزة نوبل وهو كتاب واضح ومليء بالمعلومات، وأساسي للقراءة لأي شخص يهتم بتطور ميكانيكا الكم.

إرفين شرودنجر، خطابات حول الميكانيكا الموجية، المكتبة الفلسفية، نيونيورك ١٩٦٧.

خطابات من وإلى شرودنجر، أما المراسلون الآخرون فكانوا أينشتاين، وبلانك، ولورنتس. نظرة ثاقبة تاريخية محيرة في عقول هؤلاء الرجال العظام متضمنة بعض المراسلات الرئيسية حول تناقض القطة الشهير.

جون سلانر، الفيزياء الحديثة، ماك جروهيل، نيويورك ١٩٥٥.

كتاب يحتوي على الحد الأدنى من الرياضيات، ولكنه موجه للطلاب الجادين، ومع تقادمه فإنه مقدمة رائعة لنظرية الكم في مستوى طلاب مرحلة البكالوريوس.

ج. جوردون ستايب، تطور النظريات الفيزيائية، ماك جروهيل، نيويورك، ١٩٦٧.

مقدمة أساسية على مستوى طلاب السنة الأولى الجامعيين الذي — على خلاف كثير من الكتب الموجهة للجموع — يتضمن مقدمة جيدة لنظرية الكم والفيزياء النووية، وهو كتاب تدريسي وليس خارج التخصص.

ب. ل. فان درفاردين (المحرر)، مصادر ميكانيكا الكم، بيتر سميث، ماجنوليا، ماسيتشوسيتس، ١٩٦٧.

تجميع للمقالات الأساسية الأصلية، جميعها باللغة الإنجليزية، وهى تؤدي إلى وتحتوي على المقالات التي أرست أساسات ميكانيكا المصفوفات (هايزنبرج وبورن وجوردان وديراك) لكنها لا تحتوي على الميكانيكا الموجية لشرودنجر (مجمعة وحدها؛ راجع شرودنجر). مقدمات مختصرة لكنها شاملة لكل مقال وضعت العمل في وضعة الصحيح.

جيمس د. واطسون، الحلزون المزدوج، آثينيوم، نيويورك، ١٩٦٨.

تقرير شخصي قوي وواضح حول اكتشاف بنية الدنا DNA، وهو ليس مجرد حجم صغير فقط، بل إنه مسل ويستحق القراءة.

هارى وولف (المحرر)، بعض الغرائب في التناسب، أديسون-ويسلى، ريدنج، ماسيتشوسيتس، ١٩٨٠.

يقدم هذا الكتاب أعمال مؤتمر عقد في معهد الدراسات المتقدمة، في برينستون، للاحتفال بمئوية ميلاد أينشتاين، وتضم قائمة المشاركين أسماء معروفة في الفيزياء النظرية. ويضم أيضًا جزءًا شاملًا عن إسهام أينشتاين في نظرية الكم، ومع أن الكتاب لا يحتوي على الكثير من الرياضيات فإن بعضها يتسم بالعمق وليست للقارئ العادي.

جارى زوكاف، أساتذة وولي الراقص، بانتام، نيويورك، ١٩٨٠.

وهذا الكتاب في الحقيقة عكس كتاب كابرا «الفيزياء الطاوية» فهو يروي القصة نفسها من وجهة نظر بعض غير المدربين في الفيزياء، ويجب أن يطلع كل العلماء على هذا الكتاب ليجدوا ما الذي يقدمه غير العلماء في الفيزياء الجديدة، وغير العلماء يأخذون حذرهم من أن زوكاف أحيانًا يدع حماسه يستخلص منه أفضل ما فيه، على أن العلم الوارد في هذا الكتاب ليس دائمًا دقيقًا ١٠٠٪ في عرضه، ومثل كابرا، فإنه لا يبذل إلا القليل من الاهتمام تجاه وسيلة تطوير أفكاره، لكنه لا يزال جيدًا للقراءة.

الخيال العلمي

جريجوري بنفورد، هروب الزمن، بوكيت بوك، نيويورك، ١٩٨١.

أفضل تصوير في الخيال العلمي لما يمكن أن يكون عليه باحث في الفيزياء، مترافقًا معه صورة خيالية فائقة لنوع السفر عبر الزمن المحتمل وجوده في عوالم واقعية متعددة.

فيليب ديك، الرجل في الحصن العالي، دار نشر جريج، بوسطن، ١٩٧٩.

قصة عن الواقع الموازي، موجودة في عالم هزمت فيه الولايات المتحدة في الحرب العالمية الثانية، وهو مكتوب بشكل رائع مع الحد الأدنى من العلم، لكن بقليل من المحاورة التي تأخذه بعيدًا عن الخمول.

راندول جاريت، سحرة أكثر من اللازم، إيس بوكس، نيويورك، ١٩٨١.

«ماذا لو» كانت القصص في الواقع الموازي حيث عاش ريتشارد ليونهارت فترة كافية ليضمن ألا يرث أخوه جون العرش الإنجليزى بعده، والقصص فقيرة علميًّا لكنها قصص بوليسية جيدة ومسلية.

دافيد جيرولد، الرجل الذي طوى نفسه، أميريون المتحدة، ماتيتاك نيويورك، ١٩٧٣.

تصوير مسل وشيق للتأثيرات المضللة للسفر عبر الزمن للأمام وللخلف ضمن العوالم المتعددة للواقع العمودي، ومن السهل إهمال العلم في هذا الكتاب واعتباره هراء، لكن التضمينات قريبة جدًّا من بعض الأفكار التي ذكرت في الفصل الحادي عشر من كتابنا.

كيث ريرتس، وبافان، وهارت وديفيز لندن، ١٩٦٨ (طبعة ورقية لبانثر).

ربما حدثت هذه القصة في كون مواز وربما لم تحدث، وفي كلتا الحالتين فهو كتاب جيد للقراءة.

جاك وليمسون، عصبة الزمن، سيفير، لندن، ١٩٧٧.

نشرت أولًا كحلقات في مجلة سنة ١٩٣٨ وهى قصة مغامرة وحركة محكمة من الخيال العلمي مناسب لزمانها، وهى جديرة بالملاحظة لأمر واحد فقط، ولحد علمي فإنني تمكنت من تتبع مفهوم العوالم الموازية الذي أصبح فيما بعد تفسيرًا للعوالم المتعددة في ميكانيكا الكم يكون قد ظهر في أي طبعة أولًا، حيث إن ذلك قد حدث لأول مرة سواء في الحقيقة أو الخيال. وهناك طبعًا قصص «ماذا لو» أقدم من تلك الواقعيات البديلة لكن وليمسون استخدم لغة علمية محترمة ليروي أحداثه، عقد واحد فقط بعد أن أرسيت أساسيات ميكانيكا الكم «يملك الجيوديسيون انتشارًا غير محدود لفروع محتملة، متوافقة مع اللاتحديدية تحت الذرية». ولم يستطع هيو إيفرت في رسالته للدكتوراه بعد ١٩ عامًا أن يجعل الأمر أكثر دقة مع أنه قد وصفه على أساس رياضي مضمون، ونادرًا ما يستبق الخيال العلمي في الواقع التقدم في العلوم النظرية، ويستحق الأمر الإشادة به عند حدوثه.

روبرت أنتون ويلسون، ثلاثية قطة شرودنجر (الكون المجاور، خدعة قبعة الرأس، الحمام المفرد)، منشورة كلها بواسطة بوكيت بوكس، نيويورك، ١٩٨٢.

من المستحيل غالبًا أن نصف هذه الثلاثية المسلية غير الموقرة والعبقرية، التي فيها ثلاثة احتمالات مختلفة حول موضوع الكوانتا (واحد في كل مجلد) مطبقة بحرص شديد لتقدم إطارًا للأحداث نفسها المتضمنة تقريبًا للصفات نفسها. وبشكل ما فقد فعلت ثلاثية قطة شرودنجر لنظرية الكم ما فعلته رباعية الإسكندرية تأليف لورنس دوريل للنظرية النسبية، ولكن ويلسون كان مسليًا أكثر، وإذا استطعت تذوقها واستطعام مذاقها فسيكون لديك النكهة الحقيقية لعالم الكم على لسانك.

«يكتشف» كتاب الخيال العلمي على الدوام نظرية الكم، وكل بضعة أشهر تظهر قصة قصيرة جديدة لأحد ما، الذي يكاد يكون قد قبض على الاحتمالات، ومن الأمثلة الحديثة: «طاعون شرودنجر»، لجريك بيرز، أنالوج، ٢٩ مارس ١٩٨٢، و«قطة شرودنجر»، لرودى روكر، أنالوج ٣٠ مارس ١٩٨١. وهناك قصص أخرى لها الجودة نفسها، ولكنني أذكر هاتين القصتين لاستخدامهما قطة شرودنجر كوسيلة لجذب انتباه الجمهور غير الملم بنظرية الكم، وهذا ما وضعني على طريق مراجعة واكتشاف ما قادني إلى كتابة الكتاب الحالي، وهو الذي أعطاني عنوان كتابي، وإنني أقدم شكري لهذين المؤلفين وإلى ستام شميت محرر أنالوج.

لمحة عن المترجمين:

أ. د. فتح الله الشيخ

أستاذ الكيمياء الفيزيائية بجامعة سوهاج، ألّف وترجم العديد من الكتب والمقالات العلمية للمجلس الأعلى للثقافة ولدار العين للنشر بمصر ولعالم المعرفة بالكويت وللدار العربية بليبيا وللمنظمة العربية للترجمة ببيروت.

أ. د. أحمد عبد الله السماحي

أستاذ الكيمياء الفيزيائية بجامعة سوهاج، ترجم وألّف العديد من الكتب العلمية للمجلس الأعلى للثقافة ولدار العين للنشر وللمكتبة الأكاديمية بمصر وللمنظمة العربية للترجمة ببيروت.

لمحة عن المؤلف:

جون جريبين عالم وكاتب وهو مؤلف عدة كتب من بينها: المصادفات الكونية، وغموض المادة، والكتاب الأكثر انتشارًا عن حياة ستيفن هوكنج. جون جريبين حاصل على دكتوراه فى الفلك من جامعة كمبريدج.

هذا الكتاب:

الشخص الذى لا يصدم بنظرية الكم لم يفهمها.

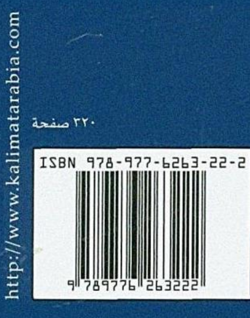
نيلز بور

ومما يسبب صدمة أن أينشتاين لم يستطيع التجاوب بقبول هذه النظرية، والنظرية من الأهمية بمكان حيث إنها قدمت الأرضية الأساسية لكل العلوم الحديثة، وبدون هذه النظرية لم نكن لنحصل على الطاقة النووية ولا القنبلة النووية ولا الليزر أو التليفزيونات أو الكمبيوتر ولا علم الجزيئات الحيوية ولا فهم الدي إن إيه DNA ولا الهندسة الوراثية بالمرة. والآن يروي لنا جون جريبين القصة الكاملة لميكانيكا الكم، وهى حقيقة من الخيال.

ويأخذنا خطوة خطوة إلى مكان أخّاذ وأكثر غرابة، يتطلب فقط أن نقترب منه بعقل مفتوح، ويُقدم العلماء الذين طوروا نظرية الكم، ويفحص الذرة والإشعاع والسفر عبر الزمن وميلاد الكون والموصلات الفائقة والحياة ذاتها، وفي عالم ممتلئ بما فيه من المسارات والغموض والمفاجآت يبحث جون جريبين عن قطة شرودنجر.

http://www.kalimatarabia.com

٣٢٠ صفحة


ISBN 978-977-6263-22-2

كلمات عربية



